INS FREDERIC MARTÍ CARRERAS

ENERGIA NUCLEAR DE FUSIÓ

UNA SALVACIÓ?

Adrià Solés Sàbat

2on Batxillerat C

Tutors: Agnés Coll, Lluís Drou Morillo.

04/12/2020

ÍNDEX

ÍNDEX 2

INTRODUCCIÓ 4

1. PROCÉS DE FUSIÓ NUCLER 5

1.1. QUÈ ÉS L'ENERGIA NUCLEAR DE FUSIÓ? 5
1.2. TIPUS DE FUSIONS NUCLEARS 6
1.2.1 FUSIÓ PER CONFINAMENT MAGNÈTIC: 6
1.2.2 FUSIÓ PER CONFINAMENT INERCIAL: 6
1.2.3 FUSIÓ PER CONFINAMENT GRAVITATORI: 7
1.3. COMBUSTIBLES PRINCIPALS 7
1.3.1 DEUTERI 7
1.3.2 TRITI 7
1.3.3 HELI-3 8
1.4. CONDICIONS PER LA FUSIÓ 8
1.4.1 LA BARRERA DE COULOMB 8
1.4.2 TEMPERATURA CRÍTICA D'IGNICIÓ PER LA FUSIÓ 9
1.4.3 DENSITAT D'IONS 10
1.4.4 TEMPS DE CONFINAMENT PER LA FUSIÓ 10
1.4.5 CRITERI DE LAWSON 10
1.5. RESIDUS 11

2. EL REACTOR DE FUSIÓ NUCLEAR 13

2.1. TOKAMAK 13
2.1.1 FUNCIONAMENT 13
2.1.2 SEGURETAT 15
2.1.3 ELS TOKAMAK REPARTITS PER ARREU DEL MÓN 15
2.2. ALTERNATIVES AL TOKAMAK, L'*STELLARATOR* 15
2.2.1 AVANTATGES PRINCIPALS 15
2.2.2 DESAVANTATGES 16

3. PROJECTE DE L'ITER 17

3.1. QUÈ ÉS 17
3.2. OBJECTIUS 17
3.3. EL SEU TOKAMAK 19
3.3.1 IMANTS 19
3.3.2 CAMBRA DE BUIT 22
3.3.3 EL MANTELL ("BLANKET") 24
3.3.4 EL DESVIADOR ("DIVERTOR") 26
3.3.5 EL CRIÒSTAT 27
3.4. LA CONSTRUCCIÓ 27

4. VISITA A L'ITER 30

5. ENTREVISTA A JORDI ROGLANS 34

CONCLUSIONS 38

NOTA D'AGRAÏMENTS 40

BIBLIOGRAFIA 41

ANNEXES 48

INTRODUCCIÓ

Des de ben petit he tingut certa curiositat per tot el que està relacionat amb la física de partícules i les maneres que la humanitat ha desenvolupat per poder-se'n aprofitar, de moment, el que sempre ens han ensenyat a classe, tant com de tecnologia, física o química ha estat l'energia nuclear de fissió, la qual ja està dominada i portem uns quants anys aprofitant-nos-en, però sempre que sortia aquest tema el que la majoria de professors afegia era: també hi ha una altre tipus de reacció anomenada de fusió on no aprofundirem perquè encara és molt experimental. Com a màxim ens explicaven conceptes bàsics per poder distingir entre les dues. Aquesta manca d'informació m'ha generat una gran curiositat que espero que pugui cobrir fent aquest treball de recerca.

El treball de recerca es basarà en tractar la meva pregunta plantejada: -És realment l'energia nuclear de fusió l'energia del futur? I encara que m'encantaria, no s'entrarà en gaires càlculs físics, atès al nivell que aquests requereixen. Em centraré més en aprofundir els conceptes perquè tot pugui quedar clar. Per tractar la pregunta tinc pensat completar certs objectius:

- Investigar més sobre com ens podem aprofitar de l'energia nuclear de fusió.
- Comprendre el funcionament del procés d'obtenció d'energia a partir d'aquesta font.
- Descobrir quins problemes hi estan havent perquè aquesta tecnologia encara no estigui en funcionament.
- Comparar l'energia nuclear de fusió amb altres formes d'obtenir energia.

Per poder complir aquests objectius, tinc pensat seguir certs procediments de recerca. La majoria d'aquests seran teòrics, ja sigui la recerca d'informació online (encara que penso assegurar-me que tota la informació que consta en el treball sigui verídica), bibliogràfica o entrevistes a gent relacionada amb l'energia nuclear com Jordi Roglans, enginyer en tècniques energètiques, especialitzat en els reactors de fissió nuclear. Com a part pràctica del treball, tinc pensat fer un petit reportatge a l'ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), si les condicions que vivim m'ho permeten, on explicaré més o menys per on et porten i què t'expliquen en una visita guiada que concretaré amb ells mateixos.

Tinc pensat estructurar el treball en els següents punts: introducció, part teòrica, reportatge de l'ITER, annex i finalment, a les conclusions, donar la meva opinió, després d'haver fet el treball, sobre la pregunta plantejada.

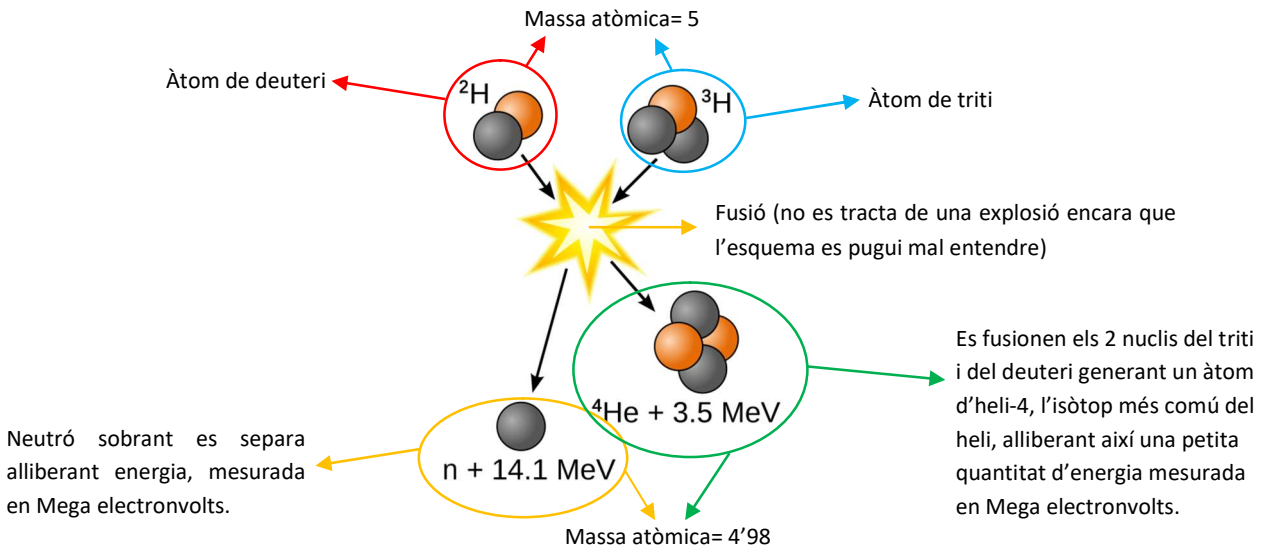
1. PROCÉS DE FUSIÓ NUCLER

1.1. QUÈ ÉS L'ENERGIA NUCLEAR DE FUSIÓ?

La fusió nuclear és una reacció que es produeix entre dos nuclis d'àtoms d'elements poc pesats com poden ser l'hidrogen, l'heli o els seus isòtops, els quals s'ajunten per formar, en unes condicions determinades que veurem més endavant, un àtom d'un element més pesat alliberant energia en el procés.

En aquest procés es produeix una obtenció d'energia gràcies a la variació de masses que hi té lloc, ja que la suma de les masses dels àtoms de l'element més petit és major a la que finalment té l'element més pesat. Això provoca un disminució de la massa final de la reacció la qual es transforma en energia seguint la famosa formula d'Albert Einstein: $E = mc^2$, on E és l'energia (J), m la massa (Kg) i c la velocitat de la llum (m/s). Aquesta reacció realment allibera una energia mínima, ja que la pèrdua de massa és molt petita degut a que un àtom de deuteri, en aquest cas, té una massa de 2'01410178 unitats de massa atòmica, és a dir $3'3434 \times 10^{-24}$ grams. Quan extrapolem aquesta reacció a quantitats més comuns per nosaltres com els grams o kilograms realment estem parlant d'una reacció la qual ens brinda una gran quantitat d'energia per poc combustible.

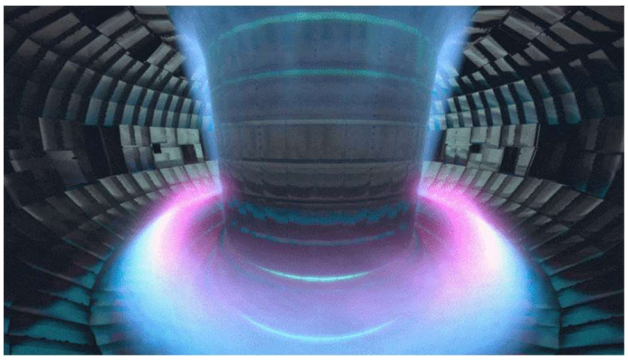
Un exemple fàcil d'aquest tipus de reacció del qual tots ens en aprofitem a diari és el Sol. En el Sol, igual que en totes les estrelles "vives" s'està produint constantment aquesta reacció. Més concretament, en el Sol s'estan fusionant nuclis d'hidrogen per formar nuclis d'heli, la qual cosa dóna com a resultat energia electromagnètica que nosaltres rebem com a llum i calor. Depenent de la magnitud de cada estrella, a mesura que l'hidrogen es vagi acabant, es començarà a cremar heli i així successivament fins a arribar al ferro, que és quan aquesta reacció deixa de ser eficient ja que es requereix massa energia per fusionar els seus nuclis. En aquest moment l'estrella pararà de generar energia i morirà, podent acabar en una nana blanca, una estrella de neutrons o un forat negre si aquesta és molt massiva.



1.2. TIPUS DE FUSIONS NUCLEARS

1.2.1 Fusió per confinament magnètic:

Consisteix en formar un plasma, que no deixa de ser un núvol de gas tant energitzat que els seus àtoms s'ionitzen gràcies a la pèrdua d'electrons de les seves òrbites, els quals passen a desplaçar-se lliurement per la seva estructura, i aïllar-lo amb un camp magnètic per escalfar-lo fins que els àtoms del seu interior tinguin l'energia i la probabilitat de col·lisió suficient com per fer que, al xocar entre sí, vencin a les forces de repulsió electrostàtiques i es fusionin. Aquesta variant és la que, com veurem més endavant, es fa servir per els dispositius de fusió nuclear.



2. Representació d'un plasma confinat a l'interior de un camp magnètic generat per un tokamak.

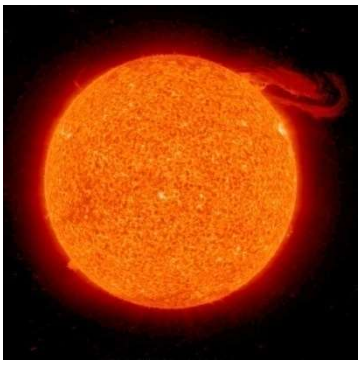
1.2.2 Fusió per confinament inercial:

Mitjançant un accelerador de partícules, s'acceleren els nuclis dels àtoms a velocitats pròximes a la de la llum per aconseguir una energia suficientment gran com per vèncer les forces de repulsió electrostàtiques, i es fan col·lidir de manera controlada perquè s'acabin fusionant. Aquest procés es pot fer servir per arribar a la fusió, però normalment s'utilitza per experimentar i no realment per a generar energia com a tal, ja que s'utilitza un sol o molts pocs àtoms per dur-lo a terme.

3. Foto del LHC, el col·lisionador de partícules més gran de mon, ubicat en el CERN, entre França i Suïssa.

1.2.3 Fusió per confinament gravitatori:

Mitjançant un camp gravitatori, els àtoms es comprimeixen entre si amb tanta força que aconsegueixen vèncer a les forces de repulsió electrostàtiques i fusionar-se. Aquesta és la fusió que es dóna en el Sol i a totes les estrelles del cosmos.



4. Sol, el qual s'alimenta de l'energia nuclear de fusió.

1.3. COMBUSTIBLES PRINCIPALS

1.3.1 Deuteri

És un isòtop estable de l'hidrogen que es troba a la naturalesa. El seu nucli atòmic està format per un protó i un neutró, cosa que fa que pesi més que un àtom bàsic de hidrogen, per el que és conegut com a hidrogen pesat, i quan es combina amb oxigen, aigua pesada. Es troba present en un de cada 6500 àtoms, d'aigua cosa que el fa molt comú a la natura i un combustible pràcticament infinit per al reactor.

1.3.2 Triti

És un isòtop radioactiu de l'hidrogen el qual compta amb un protó i dos neutrons en el seu nucli, a diferència del hidrogen comú, el qual només té un protó. Es genera de manera natural a l'atmosfera gràcies a la interacció dels raigs còsmics amb l'hidrogen. Té una freqüència d'1 àtom de triti per cada 10^{17} àtoms de hidrogen comú. És a dir és extremadament rar. També es pot generar artificialment bombardejant un àtom de liti amb neutrons de baixa energia. Encara que baixa, emet una petita radiació nuclear. És el més problemàtic dels 2 combustibles gràcies a la seva gran raresa en el medi natural. La seva raresa és tal, que es calcula que en tota la terra hi han uns 20 kg de triti, una quantitat evidentment insuficient per abastir a un reactor nuclear de fusió durant un període raonable de temps, ja que es calcula que aquest gastaria uns 300g per dia. La solució que plantegen a aquest problema és o bé extreure el triti de les reaccions de fissió de les pròpies centrals nuclears, cosa que no ens porta a cap lloc, ja que estaríem depenent d'aquesta energia i continuaríem contaminant com sempre. O la que s'està plantejant com alternativa, que consisteix en recobrir les parets del interior del reactor de fusió (*Blanket*) amb liti perquè el propi reactor generi el seu

propi triti, producte de la reacció del liti amb un neutró lliure de baixa energia, com hem comentat abans.

1.3.3 Heli-3

És un isòtop lleuger, estable i no radioactiu de l'heli. A diferència de l'heli comú (heli-4), l'heli-3 presenta un neutró menys, és a dir, el seu nucli està compost per 2 protons i un neutró. És molt escàs en el nostre planeta, ja que al ser un gas tant lleuger la pròpia gravetat terrestre no el manté i el camp magnètic i l'atmosfera el rebutgen. Per altre banda aquest és molt comú a l'espai atès a que és producte de les reaccions de les estrelles, i a la lluna, on n'hi ha quantitats considerables gràcies a la pràctica carència d'atmosfera. Aquest no es fa servir en la reacció més típica que hem vist, sinó que es combina amb el deuteri formant un àtom de heli-4 (heli comú) i un protó lliure. Aquesta reacció és més neta que la del deuteri i triti, ja que no s'ha de tractar amb triti, que encara que poc, és radioactiu, però l'escassetat d'aquest material i la complicació que suposa la seva reacció amb el deuteri el fan inviable, de moment.

1.4. CONDICIONS PER LA FUSIÓ

Aquestes reaccions són difícils d'aconseguir, ja que dos àtoms de qualsevol element es repel·len entre sí gràcies a les forces de repulsió electrostàtica que es generen entre les seves càrregues del nucli, els protons, ja que recordem que en un plasma (que és on es produeix la reacció), els electrons s'ubiquen fora de les òrbites atòmiques. Per fer-ho necessitarem 2 condicions bàsiques: tenir un plasma i poder-lo confinar efectivament. Per aconseguir-ho i permetre que els dos nuclis es puguin fusionar, s'ha de proporcionar una temperatura suficientment alta per tal que les partícules superin la barrera de Coulomb i mantenir una certa densitat crítica de ions durant un cert temps de confinament, per fer que la probabilitat de col·lisió sigui prou alta com per aconseguir xocs efectius que fusionin els nuclis atòmics dels elements de la reacció.

Per aïllar el plasma de manera efectiva tenim 2 opcions: gravitatòriament, com fan les estrelles, que atrauen el propi plasma per una gran concentració de massa. Magnèticament, la més viable per a reproduir una reacció d'aquest tipus a la terra, la qual consisteix en crear un camp magnètic amb una sèrie de super imants que aconsegueixin emmagatzemar el plasma.

1.4.1 La barrera de Coulomb

És una barrera de energia deguda a la interacció electrostàtica que el nucli atòmic ha de sobrepassar per poder arribar a fusionar-se. Aquesta barrera d'energia es pot calcular i dependrà de la separació nuclear i de les càrregues de les partícules. En funció d'on es situï aquesta barrera, haurem d'arribar a una determinada temperatura per fer efectiva la reacció. És a dir, haurem de gastar energia per poder fusionar els àtoms. És proporcionada per l'energia potencial elèctrica amb la següent fórmula:

$$U_{coul} = k\frac{q_1\ q_2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1\ q_2}{r}$$

On:
K = Constant de coulomb (aproximadament $9x10^9$)
ε_0= Permitivitat al vuit.
q_1 i q_2= Les càrregues de les partícules que interactuen.
r= Els radis d'interacció.

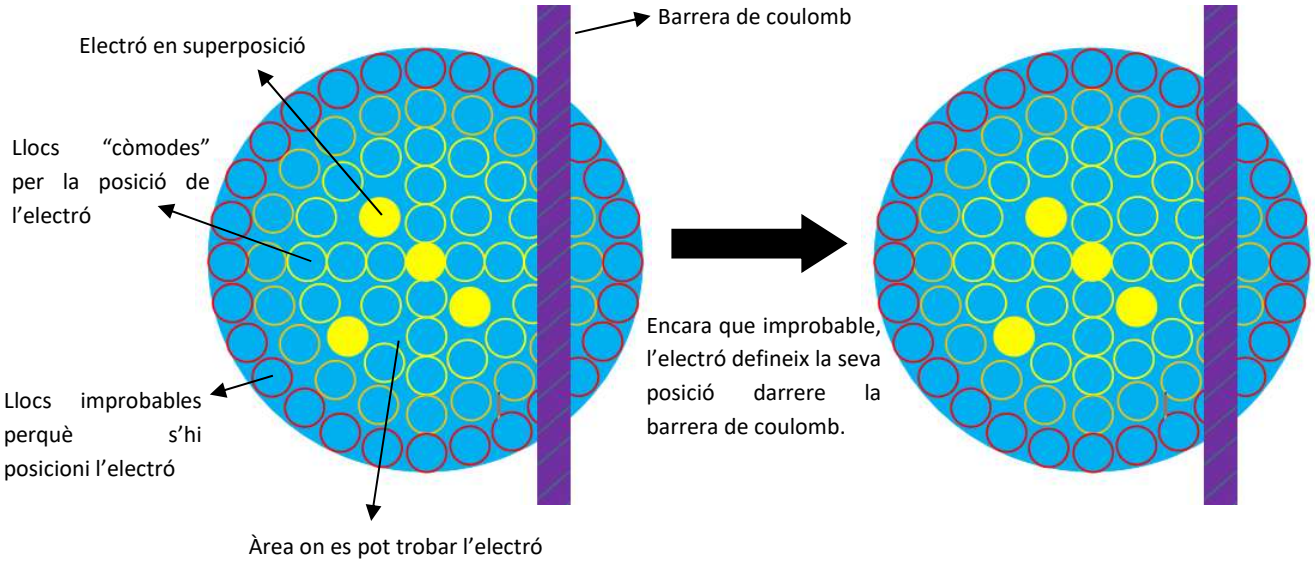
5. Fórmula de l'energia potencial elèctrica, utilitzada per calcular la quantitat d'energia necessària per passar la barrera de coulomb

1.4.2 Temperatura crítica d'ignició per la fusió

És la temperatura de fusió que obtenim un cop establerta l'energia tèrmica necessària per sobrepassar la barrera de coulomb. Tot i que la barrera de Coulomb ens dona una energia molt alta per sobrepassar-la, la quantitat d'aquesta es rebaixa al tenir en compte fenòmens quàntics com l'efecte túnel que permeten passar la barrera de Coulomb sense que una partícula tingui la necessitat d'arribar a l'energia que aquesta determina.

L'efecte túnel s'explica de la següent manera:

Els electrons, per exemple, segons la mecànica quàntica no tenen una posició concreta, sinó que oscil·len en més d'una posició en el mateix temps, i aquesta posició pot agrupar una gran quantitat de valors. És a dir, no una posició concreta sinó moltes posicions simultànies. Encara que sigui així, aquests tendeixen a ocupar certes posicions on es troben més "còmodes", però, de vegades, per simple estadística, aquests ocupen una posició no tant comú. Això, fa que aquest efecte es pugui produir, ja que aquesta posició l'adopten a l'altre costat de la barrera de Coulomb encara que no tinguin l'energia necessària per travessar-la de la manera més comú.



6. Representació gràfica de l'efecte túnel.

1.4.3 Densitat d'ions

Un ió, en física i química, és un àtom o molècula que no té una càrrega neutre, és a dir, és un àtom o molècula que està carregat ja sigui positivament (cations) o negativament (anions). Aquest procés es produeix quan se li aplica energia en forma de potencial elèctric o radiació a l'àtom o molècula. El plasma en si, no deixa de ser un núvol de gas a tan alta temperatura que alguns electrons queden lliures i es van intercanviant entre nuclis atòmics creant així ions, és a dir ionitzant el núvol de gas.

Un cop ja sabem el que és un ió, la densitat d'ions és simplement la quantitat d'ions que trobem en un determinat volum, en aquest cas es mesura en cm^3, que és el mateix que els mil·lilitres.

1.4.4 Temps de confinament per la fusió

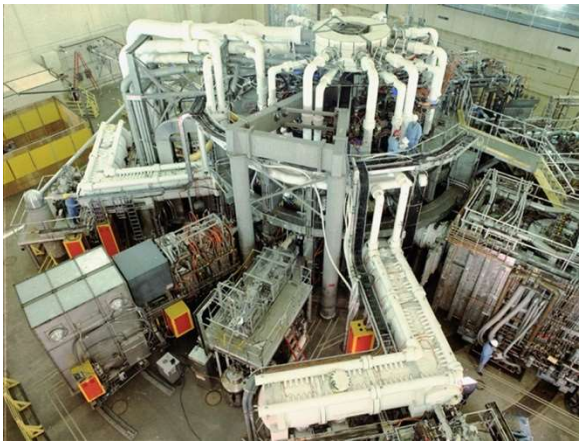
El temps de confinament en dispositius de fusió nuclear, es defineix com el temps que es manté el plasma a una temperatura per sobre de la temperatura d'ignició. Per poder generar més energia de la gastada en la reacció, el plasma ha d'estar mantingut a aquesta temperatura durant un mínim període de temps.

1.4.5 Criteri de Lawson

Un cop s'ha arribat a la temperatura d'ignició per dur a terme la fusió nuclear, s'ha de mantindre a aquesta temperatura durant un temps de confinament suficientment llarg, a una densitat d'ions suficientment alta, com per obtenir un rendiment net d'energia. En el 1957, el físic J.D.Lawson va demostrar que el producte (o divisió) de la densitat d'ions i el temps de confinament determina les condicions mínimes per la fusió productiva, i aquest punt és anomenat el criteri de Lawson, és a dir el punt d'equilibri entre el temps de confinament i la densitat de ions com per poder treure un rendiment d'aquella reacció. Aquest principi es mesura en segons/cm^3.

L'aproximació més propera al criteri de Lawson s'ha produït en el reactor de prova de fusió Tokamak (TFTR) a Princeton, Estats Units. Allà es va arribar a la temperatura d'ignició i van estar molt a prop d'arribar al criteri de Lawson.

7. J.D.Lawson (1923-2008).



8. Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR), Princeton, Nova Jersey, Estats Units.

1.5. **RESIDUS**

Un dels grans avantatges que l'energia nuclear de fusió proporciona en vers a l'energia nuclear de fissió -la que hem estat fent servir fins ara en el que coneixem com a centrals nuclears- és que per utilitzar l'energia nuclear de fusió no necessitem materials altament radioactius com l'urani enriquit, el beril·li o el plutoni. Per tant, fent us d'aquest mètode, ens estalviaria el tractament de tants residus nuclears com els que generen les centrals d'avui en dia, cosa que no només ajuda al medi ambient ja que haver de tractar amb aquests residus també comporta un gran cost econòmic per les centrals.

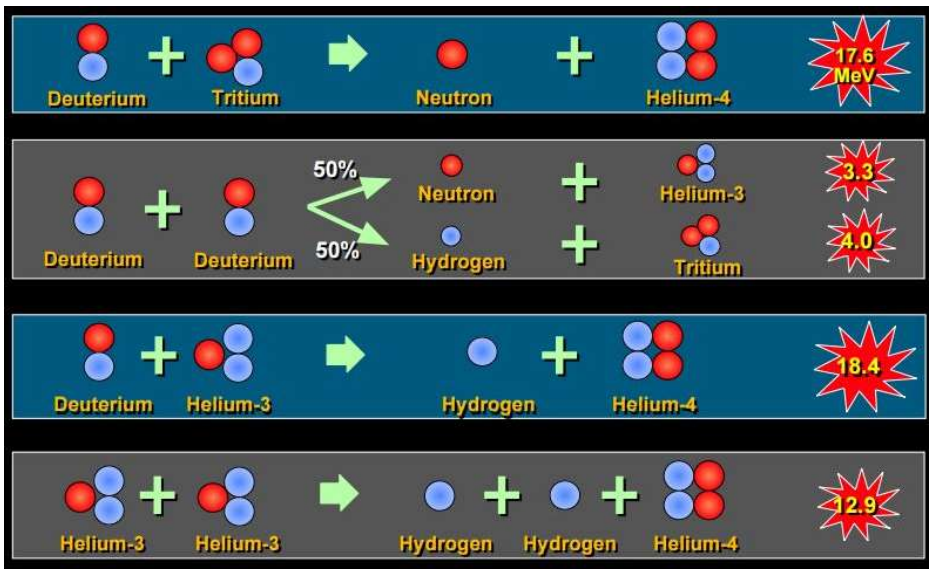
Ens estalviaríem molts de residus nuclears altament perillosos per al planeta i per a l'home? Sí, ara bé, al contrari del que molta gent pensa, aquesta reacció també genera alguns residus nuclears, molt menys radioactius que els actuals però que també s'han de tenir en compte.

Com bé hem vist abans, la reacció més fàcil de obtenir és la del deuteri i el triti, els quals es combinen i alliberen un àtom de heli -totalment inofensiu pel medi ambient, ja que és un gas tan lleuger que fuig de la gravetat de la terra i no queda atrapat a la atmosfera- i un neutró lliure carregat d'energia. És a dir, una bala radioactiva extremadament petita. Per altre banda, el propi triti, encara que poc, ja és radioactiu de per si i el seu simple pas pel reactor implica que aquesta radioactivitat serà cedida també a les parets d'aquest, les quals al ser intercanviades, hauran de ser tractades i aïllades durant un període d'aproximadament 100 anys, quantitat ínfima si la comparem amb la duració de la radioactivitat en els residus nuclears actuals. Per solucionar aquests problemes es plantegen 2 solucions.

- Blindar les parets de reactor amb materials com el liti o algun isòtop del tungstè, com recentment s'ha descobert, perquè aquestes puguin absorbir el neutró i el seu impacte.
- Fer servir combustibles alternatius, és a dir, canviar la reacció per una que no generi aquest neutró lliure, com la del deuteri + l'heli-3 per generar heli-4 (heli comú) + un protó lliure. Amb aquesta reacció, per exemple, també generaríem un protó lliure com a residu però que seria molt més fàcil de tractar atès que es podria guiar i eliminar mitjançant camps electromagnètics gràcies a la seva càrrega positiva.

L'opció més sòlida de moment, però, és la primera: Blindar el reactor perquè pugui absorbir els neutrons lliures, ja que l'hèli-3 és difícil d'obtenir i necessita una major energia perquè aquesta reacció sigui possible.

9. Interior de un tokamak amb les parets reforçades, “blanket”.



10. Altres alternatives a la reacció D-T (Deuteri-Triti)

2. EL REACTOR DE FUSIÓ NUCLEAR

2.1. TOKAMAK

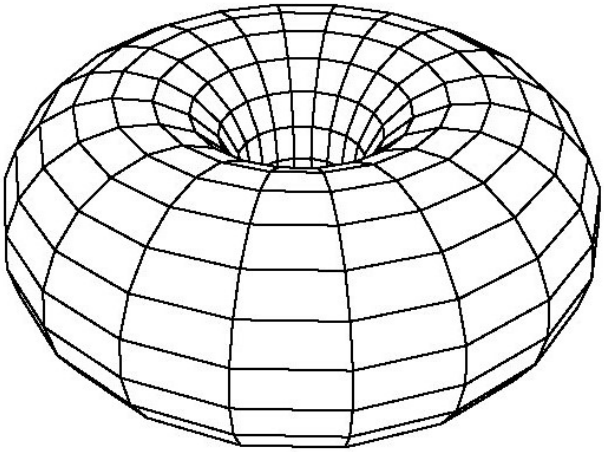
Hi ha diversos models de reactor nuclear de fusió però el més plausible de recrear fins avui en dia és el "Tokamak", que ve del rus "cambra magnètica toroïdal". Va ser enginyat a principis dels anys 50 pels físics soviètics Andrei Sajarov i Igor Tamm, i fins avui en dia, s'ha mantingut com l'opció més viable essent així adoptada per molts altres països com el Japó, els Estats Units i la Unió Europea, els quals han aprofitat per fer experiments i intentar mantenir estable la reacció de fusió durant un raonable període de temps. El que està en construcció a Ais de Provença, més concretament en el centre de Cadarache, sota el projecte anomenat ITER, també es tractarà d'un tokamak.

11. Andrei Sajarov (1921-1989).

12. Igor Tamm (1895-1971).

2.1.1 Funcionament

Un tokamak, és un reactor termonuclear per confinament magnètic amb forma de cambra toroïdal, semblant a una "*rosquilla*" sense extrems. Es tracta d'un tub buit amb gran capacitat per on circularà el plasma a altes temperatures envoltat per unes bobines i imants que generaran un camp magnètic molt potent. La finalitat d'aquest és poder confinar-hi el plasma perquè no perdi temperatura per conducció, radiació o convecció, un cop iniciada la reacció a l'estar en contacte amb les parets del reactor. Si aquest camp magnètic és prou potent com per poder confinar el plasma, els ions i electrons dins seu es quedaran atrapats viatjant a altes velocitats fins que inevitablement col·lideixin entre si i, en el cas que aquest xoc es produeixi la suficient energia com per superar la barrera de Coulomb com hem comentat abans, finalment s'acabaran fusionant.



13. Toroide.

El camp magnètic està format per:

- **Solenoide central:** Superconductor que indueix la corrent en el plasma.
- **Bobina toroïdal:** Superconductora que confina i estabilitza el plasma.
- **Bobina poloïdal:** Superconductora que confina i posiciona el plasma del toroide.
- **Cámara de buit:** Manté el plasma en el buit. Està generada per una bomba mecànica connectada al toroide la qual espira tot el seu aire interior.
- **Transformadors:** Condueixen la electricitat que abasteix a les bobines toroïdals i poloïdals.

Un material superconductor, és aquell que, en unes condicions específiques, deixa d'oposar resistència en el pas d'electricitat convertint-se així, a una temperatura concreta (normalment molt pròxima al 0 absolut, és a dir -273,15 °C), en conductors de tipus perfecte.

Els Tokamak tenen també varies criobombes que treballen sota un fred extrem per refrigerar els imants del camp magnètic (perquè puguin assolir la superconductivitat) i tots els altres components propers al plasma. Aquestes entren en funcionament després de que les bombes mecàniques hagin buidat la major part de les molècules d'aire i les impureses de la càmera toroïdal.

Com hem vist abans, fruit d'aquesta reacció n'obtenim un neutró molt carregat d'energia i un àtom d'heli comú que també està carregat d'energia. Mentre que el nucli resultant d'heli continua essent guiat pel camp magnètic i aprofitat per continuar escalfant el plasma, tots aquests neutrons són enviats per la reacció a les parets del reactor, o "*blanket*". En aquestes parets, s'està estudiant l'opció de formar-les o recobrir-les de liti metàl·lic, el qual a part d'aturar el neutró, genera triti (un dels combustibles per reacció), al fisionar-se pel propi xoc del neutró. En un futur, si tots els experiments van bé i es decideix confiar en l'energia nuclear de fusió com a font viable

d'energia, aquest xoc s'aprofitaria en forma d'energia calorífica, la qual seria utilitzada per escalfar un líquid com l'aigua, per exemple, per poder generar energia elèctrica comercial com sempre s'ha fet: utilitzant el vapor per moure unes turbines que transformen l'energia mecànica en elèctrica perquè aquesta es pugui distribuir per tota la xarxa.

2.1.2 Seguretat

En cas que hi hagués un accident en un reactor de fusió, aquest simplement aturaria la reacció automàticament al parar el subministrament de combustible (deuteri i triti) a la reacció. Aquesta no desencadenaria cap mena de reacció en cadena que pugui danyar a l'ambient com ja ha passat en altres ocasions amb la fissió. Això implica que la reacció de fusió no només és més neta i ecològica, sinó que també és més segura.

2.1.3 Els tokamak repartits per arreu del Món

Al contrari del que molta gent pensa (incloent-me a mi al començar aquest treball) l'ITER no serà ni molt menys el primer tokamak existent, potser sí que serà el primer en arribar a ser capaç de produir una reacció nuclear de fusió estable, però molts altres han estat creats i utilitzats per fer experiments amb plasma, concretament uns 226, dels quals aproximadament 50 es troben operatius.

2.2. ALTERNATIVES AL TOKAMAK, L'*STELLARATOR*

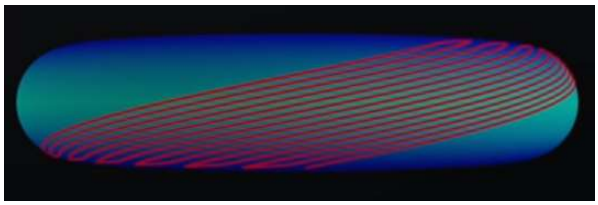
D'igual manera que el tokamak, l'*stellarator* és un reactor nuclear de fusió de confinament magnètic. La principal diferència que presenta amb el tokamak és la seva geometria, la qual ens aporta avantatges respecte el tokamak.

2.2.1 Avantatges principals

- L'*stellarator* fa moure el plasma de tal manera que no es produeix un dels problemes que tots els tokamak pateixen, la concentració del plasma a la part interior del toroide. Aquest problema en els tokamak és solucionat amb una de les parts més importants del reactor, el solenoide, que, com veurem més endavant, s'utilitza per apartar el plasma de les parets de la part interior del toroide i per donar càrregues elèctriques per escalfar el plasma.

- Es soluciona també la perduda de combustible (deuteri i triti) causada per un procés anomenat *atom drift*, o deriva d'àtoms. Aquest, fa que les partícules carregades siguin, tard o d'hora, atrapades per una òrbita que les escup fora de la òrbita desitjada per fer possible la reacció, s'escapen de les línies magnètiques que haurien de seguir. Degut a això es perd combustible, el que també vol dir que decreix la densitat del plasma i per tant, baixen també les col·lisions entre partícules, cosa que, finalment, resulta en una més baixa probabilitat de fer efectiva i mantenir la reacció de fusió. Per solucionar aquest problema en un

tokamak, es necessita un camp magnètic més fort, la qual cosa ens porta a imans més grans (per aquest motiu l'ITER és tant massiu). En canvi, els stellarators, presenten una altre alternativa més elegant, fer girar la direcció del plasma amb bobines helicoïdals, que juntament amb la seva geometria més complexa, eliminen aquest problema sense la necessitat de fer tota la màquina més gran.



14. Òrbita destructiva que causa el fenomen de *l'atom drift*.

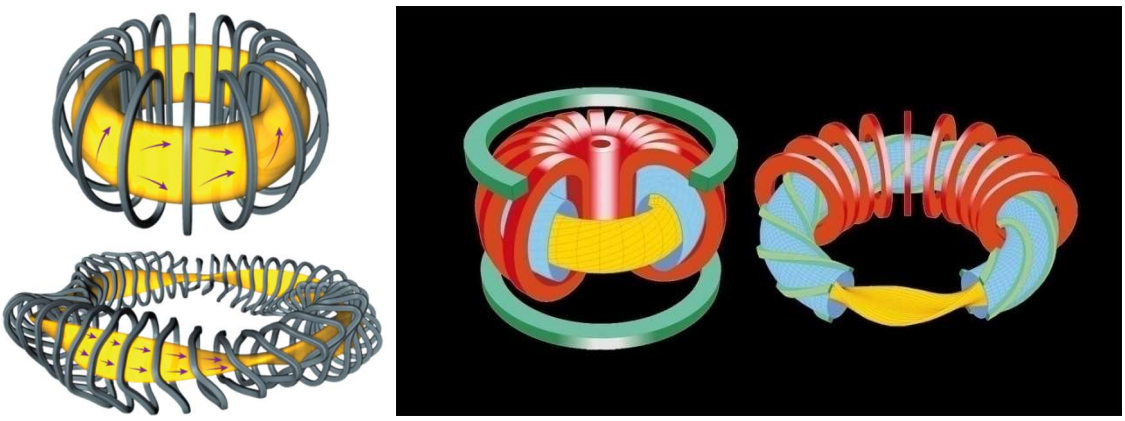
- Hi ha un estalvi significatiu d'energia, de materials i econòmic al no haver de produir i alimentar aquest solenoide central i components tant grans com els que són necessaris per un tokamak. També facilita molt la logística: en el cas que qualsevol peça de la màquina s'avariés i hagués de ser reparada o substituïda, tant econòmicament com logísticament no és el mateix haver de substituir 100.000 km en cables de bobines (com en el ITER) que "només" 100.

- Tot i ser més petits, gràcies a la seva geometria, els *stellarators* són capaços de produir camps magnètics més potents que els tokamak. Gràcies a això aquests produeixen un confinament magnètic millor que el dels tokamak.

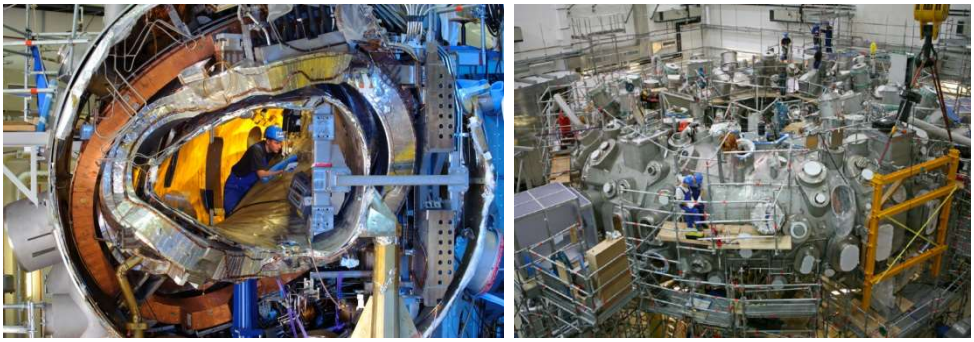
2.2.2 Desavantatges

- Encara que l'existència d'aquest reactor data de quasi la mateixa que la dels tokamak, no ha sigut fins l'arribada dels superordinadors que s'ha pogut arribar a comprendre el comportament dels plasmes a altes temperatures dins d'un *stellarator* i perfeccionar la forma d'aquests per fer viable el seu desenvolupament. Per tant, encara que el concepte és tant vell com els dels tokamak, no s'ha pogut experimentar ni molt menys el mateix que s'ha fet amb els tokamak.

- Degut a la seva nova reinvenció, encara s'està perfeccionant i treballant en el seu desenvolupament. Queden alguns punts als quals no s'hi ha arribat encara, com per exemple que la màquina sigui capaç de suportar tant altes temperatures com per arribar a la fusió.



15 i 16. Geometria i comportament del plasma de un tokamak en comparació a un stellarator.



17 i 18. Stellarator weldstein 7x en construcció a Greifswald, Alemanya.

3. PROJECTE DE L'ITER

3.1. QUÈ ÉS

L'ITER o International Thermonuclear Experimental Reactor, és un projecte científic i tecnològic a escala mundial el qual conta amb la col·laboració de 35 països: Unió Europea (que aporta un 45% del pressupost), Estats Units, Japó, Corea del Sud, Xina, India i Rússia per construir el reactor nuclear de fusió Tokamak més gran i poderós de la història per així demostrar la viabilitat científica i tècnica de l'energia nuclear de fusió com a font d'energia pràcticament inesgotable i no contaminant. Actualment aquest es troba en construcció al sud de França.

3.2. OBJECTIUS

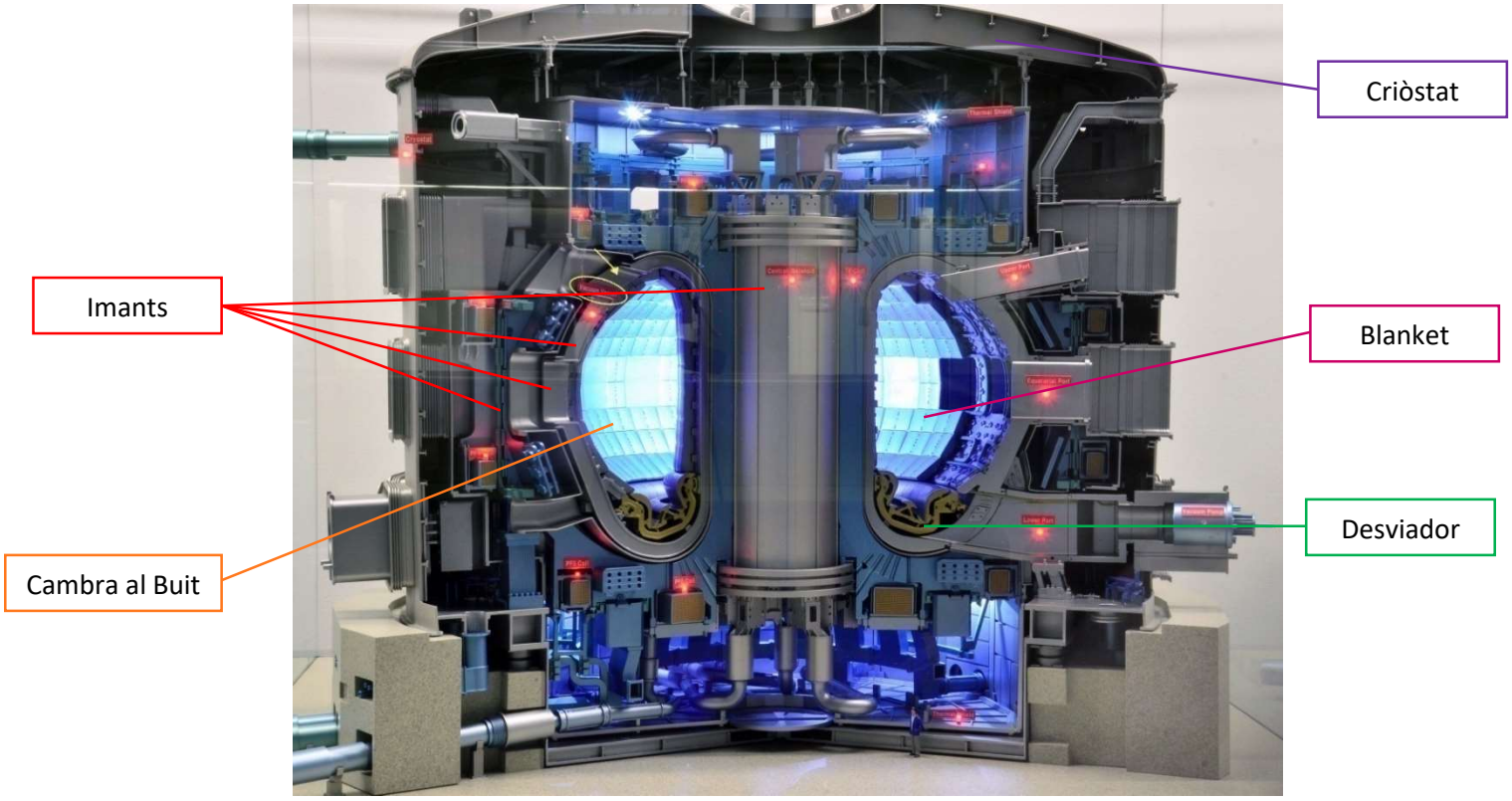
Els seu objectiu més important és testar tots els elements necessaris per a la construcció i funcionament d'un reactor de fusió nuclear. Això serviria de demostració comercial, una manera d'obrir els ulls a la gent i fer-los-hi veure l'existència i la validesa d'aquesta nova manera d'obtenir energia. L'altre gran objectiu, ja aconseguit, és reunir els recursos tecnològics i científics dels programes d'investigació desenvolupats per la Unió Soviètica, els Estats Units , Europa (a través d'EURATOM) i

Japó. És a dir les potències capdavanteres en aquest camp. De la mateixa manera que es reuneixen per compartir aquests recursos també és important recalcar que comparteixen, juntament amb tots els altres països participants en el tractat, les despeses del programa. Sense l'existència d'aquest programa hagués estat molt més difícil, degut a les notables diferències entre aquests països i els elevadíssims costos del programa en sí.

Aquest projecte és de vital importància per l'avenç en aquest camp, es preveu que serà el primer reactor el qual podrà aconseguir un guany net d'energia. És a dir, que l'energia utilitzada per començar i mantenir la reacció sigui inferior que la generada per la mateixa, fent possible d'aquesta manera preestablir l'energia nuclear de fusió i les centrals nuclears de fusió com una variant viable d'obtenció d'energia neta i comercial. Al ser una prova, però, no contarà amb una central per l'obtenció d'electricitat. De moment, servirà com a experiment per saber si realment es pot confiar en aquest mètode per tenir una reacció d'aquest tipus mantinguda durant un llar període de temps. L'objectiu final d'aquest programa és tenir una Q >10, és a dir, que el guany d'energia net sigui 10 cops major que la quantitat d`energia dedicada per el funcionament de la reacció.

19. Ceremonia de l'acord de l'ITER, 21 de novembre de 2006, Palau de l'Elisi, França. En aquesta fotografia podem veure el president francès, Jacques Chirac i el president de la comissió europea, M.José Manuel Durao juntament amb els primers ministres de les 7 primeres nacions en participar en el projecte.

3.3. EL SEU TOKAMAK



20. Maqueta del tokamak acabat de l'ITER.

3.3.1 Imants

Es tracta de un dels sistemes d'imants superconductors més grans mai construït, el formen deu mil tones d'imants que són capaços de generar uns 51 gigajoules (Gj). Aquests seràn els encarregats de produir els camps magnètics que iniciaran, confinaran, modelaran i controlaran el plasma necessari per a la reacció.

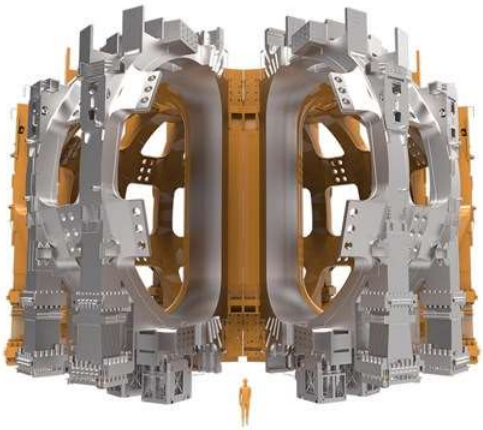
Estan formats majoritàriament per niobi-titani (Nb-Ti) o niobi-estany (Nb_3Sn). Materials que adopten la superconductivitat un cop són portats a temperatures extremadament baixes, a 4 kelvin (-269ºC), els quals no oblidem que han de ser refrigerats al costat d'un plasma que arriba a temperatures deu cops la temperatura del centre del Sol. Tot i així, els materials superconductors són imprescindibles, ja que gràcies a les seves propietats són capaços de transportar més corrent i generar un corrent magnètic més gran que els conductors convencionals, cosa que redueix la despesa d'energia i els fa més econòmics d'operar.

Aquest sistema massiu de imants superconductors està format per:

- **Sistema de camp toroïdal:**

És format per 18 imants en forma de "D" de camp toroïdal col·locats al voltant de càmera de buit els quals s'encarreguen de mantenir el plasma confinat. Les bobines de

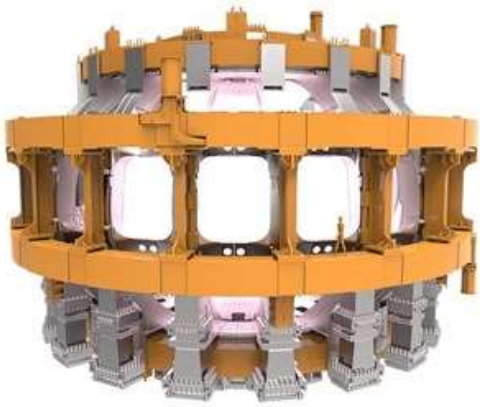
camp toroïdal que el formen estan dissenyades per produir una energia magnètica de 41 gigajoules cadascuna i un camp magnètic de 11'8 tesla. Pesen 360 tones cadascuna i mesuren 9x17m, es tracta de un dels components més grans de l'ITER.



21. Sistema i bobines de camp toroïdal en comparació a una persona.

- **Sistema de camp poloïdal:**

El formen 6 bobines de camp poloïdal situades fora la estructura del sistema de camp toroïdal. Aquestes s'encarreguen de donar-li estabilitat al plasma allunyant-lo de les parets del reactor. La més llarga té un diàmetre de 24 metres, pesa unes 400 tones i és capaç de generar 4 gigajoules d'energia elèctrica i 6 tesla de camp magnètic.



22. Bobines del camp poloïdal.

- **Solenoide central:**

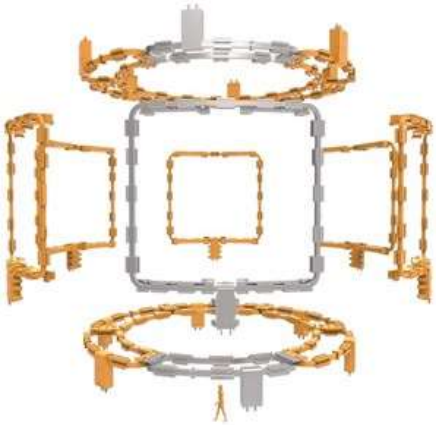
És la columna vertebral de tot el reactor, es tracta d'una gran columna de 18 metres d'altura i quatre d'amplada formada per 6 paquets independents de bobines fetes per cables de niobi-estany, igual que en les anteriors parts, la qual pesa unes mil tones. Haurà de ser capaç de resistir forces de fins a 60 MegaNewtons (el doble de la força generada per l'enlairament del transbordador espacial).

El solenoide central desenvolupa dos funcions primordials: aplicar corrent elèctric al plasma per escalfar-lo i mantenir-lo si és necessari i actuar com les altres bobines dels altres sistemes anteriors, és a dir, redireccionant el plasma, en aquest cas, per tal de que no es concentri a l'interior del torus.

23. Solenoide central sense l'estructura del nucli recobrint-lo.

- **Bobines de correcció:**

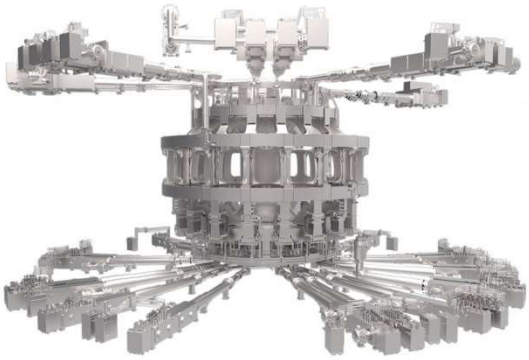
Es tracta de 18 bobines situades al voltant de la cambra de buit i de les altres parts mencionades anteriorment, són molt més petites i tenen un poder molt més inferior a les altres bobines. La seva única funció és ajudar a corregir la desviació o mal flux del plasma deguda a errors geomètrics causats per petites desviacions fetes en el moment de muntatge.



24. Bobines de correcció.

- **Alimentadors dels imans:**

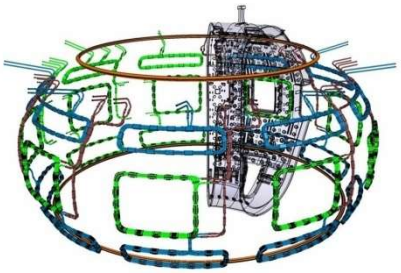
Són vitals per al funcionament de l'ITER. Tots ells, formen un sistema de 31 alimentadors superconductors que transporten l'energia elèctrica a totes les bobines i imans del sistema i regulen els líquids criogènics per refredar i controlar la temperatura dels imans. Aquest sistema està format per unes barres superconductores fetes amb conductes d'acer preparat per aguantar canvis bruscos de temperatura que contenen cables de niobi-titani, els quals s'encarregaran de transmetre l'electricitat a -269ºC sense pràcticament resistència elèctrica.



25. Alimentadors connectats als imans i bobines.

- **Bobines interiors:**

Òrgan format per un total de 29 bobines situades a l'interior de la cambra de vuit que s'utilitza per aportar més estabilitat al plasma. Dos d'aquestes bobines es situen per sota i per sobre de la cambra, per controlar el plasma verticalment i les altres 27 s'encarreguen de crear pertorbacions electromagnètiques per evitar certes inestabilitats del plasma. A diferència de les altres bobines i imants aquestes són convencionals, no són superconductores.



26. Esquema de les bobines interiors.

3.3.2 Cambra de buit

Perquè es produeixi la reacció és essencial que aquesta es produeixi en un entorn al buit, així ens assegurem de que la permitivitat del medi sigui la més baixa (ε_0), cosa que fa que la força elèctrica no disminueixi tant com en altres medis. També ens aporta un control sobre del que tenim dins de la cambra, que siguin només els gasos que ens interessen sense que es barregin amb els de l'ambient sense cap factor exterior com la força de fregament amb l'aire que ens pugui complicar les coses. A part

de crear el medi perfecte perquè es produeixi la reacció, la mateixa cambra actua també com a primera barrera de seguretat per mantenir la radioactivitat controlada. La cambra de buit: millora la protecció contra la radiació i l'estabilitat del plasma, actua com la principal barrera de confinament per a la radioactivitat i proporciona suport a altres components situats al seu interior com el "*blanket*" i el dispersador, que s'encarrega de extreure calor i cendres de dins del recipient.

En un dispositiu tokamak, com és en aquest cas, com més gran sigui la cambra de buit, més fàcil serà confinar el plasma i arribar als alts nivells d'energia necessaris per aconseguir una fusió nuclear. Per aquest mateix motiu, i els abans esmentats, el tokamak de l'ITER és tant massiu.

La cambra de buit de l'ITER, que constarà d'un volum interior de 1.400 m^3, proporcionarà unes condicions excepcionals per experimentar en aquest camp. Hem de tenir en compte que el volum de plasma que es generarà al centre d'aquesta cambra, 840 m^3, serà uns 10 cops més gran que el del Tokamak més gran actualment operatiu. Aquesta cambra de buit mesurarà uns 19'4 metres diàmetre i uns 11'4 metres d'altura, pesant un total de 5200 tones quan se li afegeixin totes les parts de l'interior.

Tot aquest sistema el formen:

- **El blindatge de les parets:**

Aproximadament un 55% de l'espai entre la doble paret de la cambra serà ocupat per aquest blindatge en forma de blocs modulars, és a dir petits blocs individuals que s'acoblaran entre sí quan es muntin (com blocs de "lego"). Cada bloc modular pesa uns 500kg i està fet d'acer inoxidable electromagnètic. La seva funció principal és protegir altres components situats fora de la cambra de buit com els imants o els sistemes de refrigeració.

27. Un dels blocs modulars de l'estructura del blindatge.

- **L'escut tèrmic:**

Consta de dos capes situades entre la cambra de buit on es mourà el plasma i el criòstat per minimitzar la gran quantitat de calor transferida per radiació calorífica i

conducció. És l'escut, entre d'altres components com el "*blanket*", el qual separa l'interior de la cambra que estarà a aproximadament a 100 milions ^{0}C dels altres components que han d'operar a 4'5 K (-268'65 ^{0}C) per assegurar la superconductivitat. No tota la calor l'absorbeixen aquestes dues capes, però si que ha de reduir la calor residual al màxim perquè la planta del criòstat s'encarregui de extreure-la del tot.

Aquest sistema d'escuts tèrmics consta de panells d'acer inoxidable amb una baixa superfície d'emissivitat (és a dir que absorbeixen poca energia tèrmica) que, quan l'operació del plasma estigui activa, estaran refrigerats constantment amb heli a 100 i 80 K, uns -173^{0}C i 153^{0}C.

28. Tot el conjunt de panells d'escut tèrmic un cop siguin muntats.

3.3.3 El mantell ("*Blanket*")

Es tracta de la capa interior que recobreix tot el nucli i separa el plasma de la resta de components. Aquest es muntarà a partir de 440 blocs individuals formats per un panell de paret i un bloc d'escut que mesuren 1 x 1'5 metres i pesen 4'6 tones. La seva funció principal és la de protegir els altres components del reactor de les altes temperatures i de la radiació de neutrons del plasma del seu interior, ja que és l'única part que manté contacte amb l'àmbit on es troba el plasma. Tot i així, el contacte mai és directe, ja que el plasma està confinat dins d'un camp magnètic i, per tant, no toca les parets del reactor.

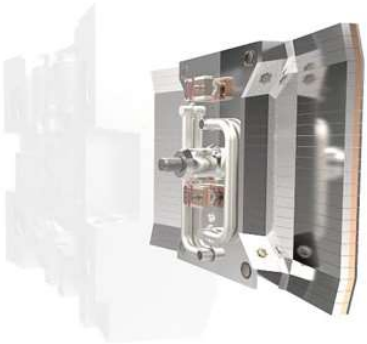
Si els experiments de l'ITER van bé i en un futur es decideix optar per crear una central elèctrica de fusió nuclear el "*blanket*" també es farà servir per aprofitar l'energia tèrmica de la reacció per escalfar aigua que circuli pel seu interior i així, fer-la servir per obtenir energia elèctrica com a la resta de centrals elèctriques (l'aigua en estat líquid s'escalfa, passa a estat gasós i s'aprofita l'energia cinètica d'aquest gas per moure un grup de turbines que generen energia elèctrica).

29. Porció del "*blanket*" en comparació amb una persona.

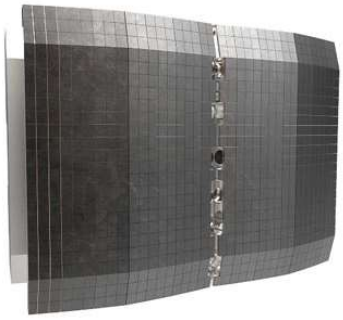
El "*blanket*" està format per dos tipus de panells diferents:

- **Panells de paret:**

Són els panells que es troben a davant de tot, els que són més propers al plasma, i són els encarregats de suportar el flux de calor del plasma. Estan fabricats amb rajoles de beril·li unides amb un aliatge de coure i acer inoxidable, tot i que en un futur s'espera experimentar també amb altres materials que poden ser beneficiosos per la reacció com el Liti, mencionat anteriorment en el treball. Depenent de la seva posició respecte la cambra de buit on es produeix la reacció rebran una quantitat de calor o una altre, però s'estima que tots poden arribar a suportar 4'7 MW/m^2. Al llarg de la vida operativa de l'ITER s'estima que aquest es substituiran com a mínim una vegada.



30. Interior del panell, per on es fixa amb el bloc d'escut.

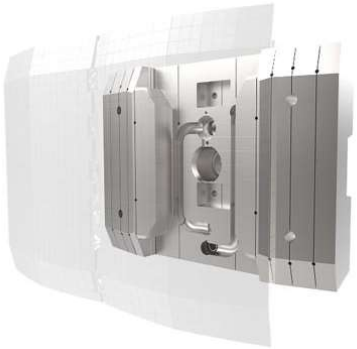


31. Exterior del panell, la part encarada al plasma.

- **Blocs d'escut:**

Estan situats darrere dels panells de paret, s'encarreguen de protegir els altres elements de la radiació de neutrons despresa per la reacció i de fer circular l'aigua per extreure la gran càrrega de calor que es produirà durant la reacció. I en el cas que es volgués fer una central elèctrica, per poder obtenir energia.

Cada bloc amb el seu respectiu panell de paret, seran acoblats meticulosament amb tolerències menors a 10mm del planejat a l'interior de la cambra de buit.



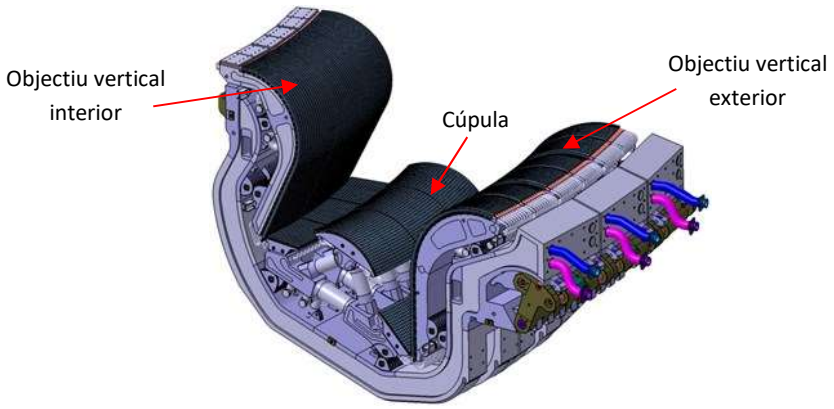
32. Bloc d'escut situat darrera del panell de paret.

3.3.4 El desviador ("*Divertor*")

Com heu pogut veure a la imatge anterior del "*blanket*", per completar la forma toroïdal que forma el reactor falta la part de sota, es tracta del "*divertor*". Aquest s'encarrega de protegir els elements que es troben al seu voltant, extreure la calor i la cendra produïda per la reacció de fusió, minimitzant així la contaminació del plasma.

El desviador en si, està format per un total de 54 blocs amb una estructura d'acer inoxidable i tres components orientats directament al plasma: els objectius verticals interior i exterior i la cúpula. Els objectius verticals interior i exterior en particular estan situats a la intersecció de les línies de camp magnètic, on el bombardeig de partícules és particularment intens a l'ITER, això vol dir que han d'aguantar més impactes de partícules que els altres components del "*blanket*", i tant mateix més energia cinètica rebuda que s'acaba transformant en calor. Concretament, s'estima que rebran entre 10 i 20 MW/m^2, depenent de la fase de la reacció, de calor, unes deu vegades la calor que experimenta una nau espacial en la seva reintroducció a la atmosfera. Per aquest motiu, aquests dos components en particular, seran refrigerats amb aigua i protegits amb tungstè, el metall amb la temperatura de fusió més elevada del planeta.

Per demostrar que aquests components realment seran capaços de resistir aquestes quantitat d'energia calorífica tant elevada s'han estat provant prototips a escala real a altres instal·lacions construïdes també per l'ITER a Rússia, a part dels experiments ja realitzats per provar el comportament del tungstè en altres reactors de fusió com el JET tokamak, a Regne Unit.



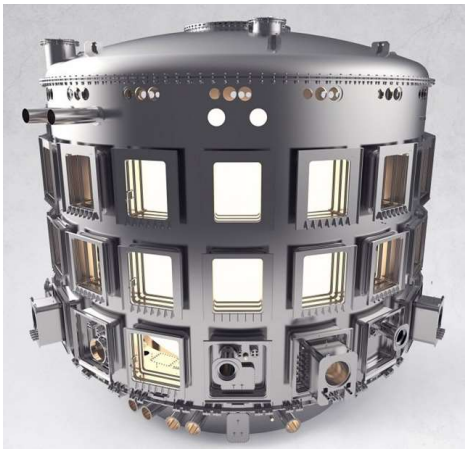
33. El desviador i les seves parts.

3.3.5 El criòstat

Es tracta de la clova de tot el reactor, el que englobarà tots els components i s'encarregarà d'assegurar que el reactor operi amb les condicions indicades, produint un entorn gebrat i al buit.

Es tracta de un recipient de 30 metres d'alçada i d'amplada i 28 de diàmetre fabricat amb acer inoxidable, foradat per varis costats per permetre l'accés al manteniment del reactor i als sistemes de refrigeració i alimentació. Aquest, també contarà amb manxes que permetran l'expansió i contracció del material donada gràcies les temperatures extremes que haurà de suportar.

De moment, la seva pesa més pesada, la seva base, ja ha esta instal·lada a les instal·lacions de l'ITER a Cadarache.



34. Model 3D del criòstat de l'ITER sense els components a dintre.

3.4. **LA CONSTRUCCIÓ**

Creat a partir de aproximadament un milió de components, la mida i el pes dels components més grans, la precisió i perfecció amb que ha d'estar construït, la diversitat de constructors repartits per tot el mon i el poc temps per fer-lo es

combinen per fer de l'ITER una de les majors obres d'enginyeria de tots els temps. Tant des del punt de vista de les infraestructures com des de les tecnologies necessàries per als components del reactor, es planteja un repte per tots els països que hi participen. Per exemple, per a la construcció de les bobines magnètiques ha estat necessari multiplicar per deu la producció mundial dels materials necessaris per els cables que les formen, i l'elaboració d'aquests cables ha necessitat 8 anys de producció conjunta, en fàbriques de la Unió Europea, la Xina, Corea, Japó, Rússia i els Estats Units. Perquè ens puguem fer una idea, es necessitaran 100.000 km de cable de niobi-titani o niobi-estany per fer totes les bobines de l'ITER, és a dir, si els ajuntéssim en línia recta, aquests podrien fer unes 2 voltes i mitja a la terra. Això planteja un altre gran problema, ja que si qualsevol component falla o és defectuós es tardaran anys en poder arreglar-lo o substituir-lo, per no parlar dels costos que això suposaria.

35. Transport de una bobina de camp toroïdal cap al centre de Cadarache.

Els costos del projecte han pujat a mesura que han anat passant els anys. Abans de que comencés s'afirmava que es podia construir per sota dels 5.000 milions d'euros. Un cop començat, els costos estimats fins que s'acabés el projecte es creia que rondarien la quantitat dels 22.000 milions d'euros, però les noves aproximacions situen aquests cap al doble d'aquesta quantitat, entre 45.000 i 65.000 milions d'euros, només per costejar-lo abans de la fase final de construcció, si li sumem aquesta, les estimacions d'avui en dia apunten a uns 80 billons d'euros finals.

Tot i que la construcció s'ha anat retardant, mica en mica es va avançant. De moment, des del 2010 en que va començar la construcció, s'ha aconseguit aplanar les 42 hectàrees que ocupa el complex i construir l'edifici per acollir al reactor nuclear i els altres edificis i construccions auxiliars necessaris per generar el primer plasma. Aquest mateix març de 2020, s'ha aconseguit instal·lar amb èxit la base del criòstat de 12.500 tones enviat des de l'Índia. És el primer pas per començar a construir el reactor. Recentment, també ha sigut muntada la segons peça del criòstat del reactor. Altres peces també van arribant, com per exemple: 2 bobines toroïdals, arribades a l'abril proveïdes per Itàlia i el Japó, la primera bobina de camp poloïdal, procurada per

Europa, arribada des de Xina aquest juny i el primer sector de la bomba de succió al buit, proveït per Corea del Sud aquest juliol.

Les següents fases previstes són: acabar completament la construcció del torus, cap a l'any 2022, segellar el criòstat amb tots els components acoblats al seu interior, cap a l'any 2024, i començar a posar en marxa el reactor per finalment produir el primer plasma (que no fusió) cap a finals de 2025. Un cop aconseguit això, s'aniran fent experiments i ampliant progressivament la màquina fins el 2035, que és quan es calcula que serem capaços de començar l'operació del deutèri-triti. L'objectiu dels 10 primers anys d'aquesta operació és arribar a Q = 1, és a dir treure un rendiment d'energia nul, que encara que sembli absurd és un pas molt important tenint en compte que no s'ha aconseguit mai de moment. Un cop s'hagi aconseguit això, s'aniran fent proves i experiments fins a arribar a l'esperat Q > 10.

36. Instal·lacions actuals de l'ITER, centre d'estudis nuclears de Cadarache, Sant Pau de Durença, França.

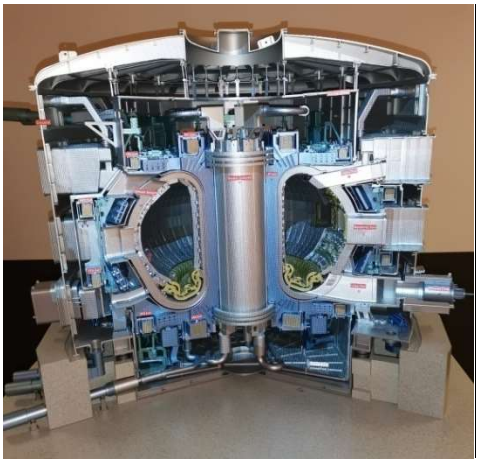
37. Base del criòstat ja al interior de l'edifici de muntatge del reactor.

4. VISITA A L'ITER

Tot i els inconvenients presentats per la situació on ens trobem en l'actualitat, el passat 1 de desembre finalment vaig poder anar a visitar les instal·lacions de les que us he estat parlant en aquest treball; les instal·lacions de Cadarache, el centre d'estudis nuclears on es troba en construcció el projecte de l'ITER. Els meus objectius principals eren acabar de concretar el tema després d'haver estat preparant aquest treball amb antelació a la visita i poder veure en persona la gran maquinaria i tecnologia de dimensions gegantines de la que he estat parlant i comprendre una mica més quin és el seu funcionament.

Després de 5 hores de viatge en cotxe cap a Sant Pau de Durença i mesos en contacte amb la meva guia de l'ITER un dimarts a les 11:30 vam (jo i el meu pare) arribar a Cadarache. Al conèixer la guia en persona ens va explicar, tot en anglès, que érem els únics que havíem aconseguit arribar de 15 persones que havien reservat la seva visita a l'ITER i que, per tant, tindríem el privilegi de fer una visita privada.

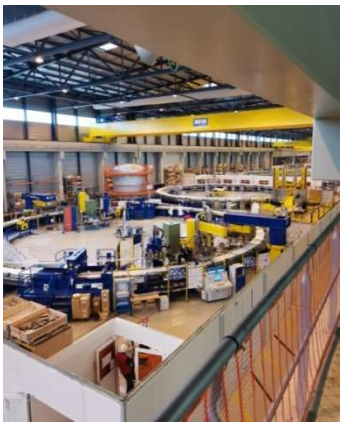
Des del primer moment ens van deixar molt clar que no podíem fer fotos a tot i que ens ensenyaria certes zones no restringides al públic, ja que la zona principal on s'emmagatzema la part de reactor que porten muntada està restringida, com és d'entendre. Vam començar la guia per una petita estança utilitzada anteriorment per l'acoblament de certes peces de l'estructura de les instal·lacions reconvertida en un petit museu on s'explica amb tot detall tot el relacionat amb l'energia nuclear de fusió i amb el projecte de l'ITER. Allà ens va fer una petita exposició oral amb els conceptes més bàsics que havíem d'entendre. Gràcies a la preparació que he tingut amb aquest treball, no vaig aprendre gaire res nou, però em va ajudar per acabar d'entendre certs conceptes que encara em ballaven una mica i per prendre algunes fotos a algunes coses que no havia vist en persona, com la maqueta de l'apartat 3.3 o la estructura característica on es situa el reactor en construcció des de lluny.



38. Maqueta del tokamak acabat de l'ITER.

39. Vista allunyada de les instalacions de l'ITER amb el sarcòfag on es troba el reactor en construcció al mitg.

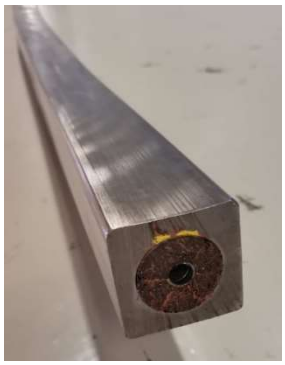
La següent part de la visita, la més interessant sota el meu punt de vista, consistia en endinsar-nos a una de les naus industrials per veure com és la construcció i assemblatge dels imants de camp poloïdal més grans. Un cop allà, la guia ens va explicar que era una de les poques peces que es fabrica a les instal·lacions, no per cap motiu en especial, sinó per necessitat, ja que és impossible transportar imants circulars gegants de 17 i 25 metres de diàmetre, d'entre altres motius perquè al ser imants, no es poden dividir en peces d'un mateix, ja que perdrien les seves propietats magnètiques (si parteixes en dos un imant, de les dos parts sobrants en surten dos imants). Un cop ens va explicar el problemes logístics que aquests suposaven, ens va ensenyar el procés que es segueix per a construir-los i mostres reals dels diferents materials (que ja he esmentat en el treball, com veureu a continuació) amb els que són construïts.



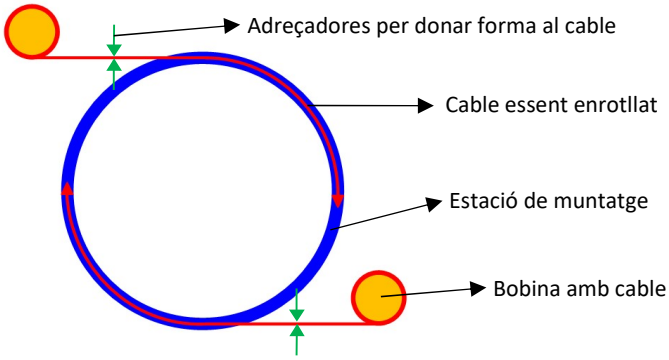
40. Interior de la nau de muntatge dels imants de camp poloïdal.

El procés en si pot semblar simple, però la seva mida, precisió i poca maniobrabilitat dels materials el posen a l'altura de l'obra d'enginyeria que aquest projecte comporta. El procés que segueixen és el següent:

Cada cercle blau com els de la foto, es tracta d'una estació de muntatge per una capa de l'imant final. A cada estació de muntatge hi ha dues bobines de "cable" (realment sembla més una secció d'una biga) de niobi-titàni recobert d'acer inoxidable, amb un petit forat en el seu interior fet perquè hi passi el líquid refrigerant (heli líquid) perquè pugi arribar a la superconductivitat quan faci falta. Aquestes bobines estan col·locades en diagonal i tangents al cercle de muntatge, on es va estirant, donant forma i embolicant amb una cinta tèrmica (per evitar el màxim possible l'increment de temperatura) el cable de les dos bobines simultàniament per, finalment ajuntar els dos extrems de cable formant una doble capa.



41. Cable utilitzat per la construcció dels imants.



42. Representació gràfica del funcionament del muntatge dels imants.

43. Mostra de un cable al descobert i un cable embolicat en cinta tèrmica.

Un cop es completa aquesta estructura circular de doble capa, és ajuntada amb unes altres 8, una a sobre de l'altre, per ser fixades amb resina d'epoxi. Un cop s'escalfa per endurir la resina, s'acaben de muntar els components més externs per induir-hi la corrent i es testa el seu comportament amb corrents i temperatures menys radicals que les demanades per el funcionament del reactor per comprovar que no hi hagi cap problema.

44. Imant embolicat en mantes tèrmiques per endurir la resia d'epoxi (primer cercle) i un altre de diferent ja essent testat al seu costat.

Un cop ja s'ha verificat que l'imant no tingui problemes i estigui llest per muntar, es desmunta l'estructura feta servir per testar-lo i es prepara per a ser emmagatzemat fins que pugui ser col·locat en el reactor final.

45. Imant ja acabat (aquest en concret, al ser de la mida més petita no està construït allà, sinó que prové de Xina)

Per finalitzar la visita, la guia ens va passejar amb cotxe pel costat del sarcòfag on es troba el reactor a mig construir on no es podia veure res, ja que estava tancat, però mentre mirava pels voltants, vaig estar el suficientment atent com per distingir un imant de camp toroïdal, dins d'una nau que quedava mig oberta, embolicat en plàstic -devia acabar d'arribar- i la tercera part del criòstat, embolicada també en plàstic, col·locada a l'exterior del sarcòfag del reactor, preparada per ser muntada un cop acabin d'acoblar i soldar la segona part. Malauradament d'això no vaig poder fer cap foto ja que en aquells sector estava restringit fer-ne.

5. ENTREVISTA A JORDI ROGLANS

El doctor Jordi Roglans Ribas és el director de la divisió d'Enginyeria Nuclear del Laboratori Nacional d'Argonne, Chicago, Estats Units. És un enginyer nuclear amb una gran experiència en el camp que treballa a Argonne des del 1987. És el responsable de supervisar les operacions d'aquesta divisió nuclear i proporcionar lideratge programàtic i planificació estratègica. La divisió d'Enginyeria Nuclear del Laboratori Nacional d'Arogonne es dedica al desenvolupament i millora de tecnologia nuclear, incloent reactor i cicles de combustible avançats, investigació de materials, seguretat nacional i programes de gestió ambiental.

46. Dr. Jordi Roglans Ribas

- **A què has dedicat la teva carrera i a què et dediques actualment?**

  Vaig estudiar enginyeria (tècniques energètiques) a Barcelona i enginyeria nuclear de postgrau als Estats Units. M'he dedicat a recerca en tecnologia nuclear, sempre en el camp de la fissió. He treballat en el desenvolupament de reactors avançats, en programes per millorar la seguretat de reactors de disseny rus, i en programes per canviar el tipus de combustible en reactors de recerca.
  Actualment treballo en el disseny d'un reactor de recerca refrigerat amb sodi líquid. Aquest reactor ha de ser una eina (en diem el Versatile Test Reactor) per desenvolupar combustibles (nuclears) i materials per la nova generació de reactors de fissió.

- **Creus que l'actual energia de fissió és sostenible, és a dir, es podrà continuar fent servir de cara al futur? Si és així quines millores es plantegen?**

  L'energia de fissió és sostenible, però cal reciclar el combustible (urani) que no es consumeix tot en la càrrega de combustible. Els reactors i el cicle de combustible actuals (reactors refrigerats amb aigua i cicle de combustible sense reciclar – el que aquí en diem "once-through fuel cycle") consumeixen només una part molt petita de la carrega d'urani. Els reactors avançats es dissenyen per poder reciclar i utilitzar

l'urani molt més eficientment. Això permet multiplicar les reserves d'urani i fer que la fissió pugui ser una font d'energia per moltes generacions futures. Aquest tipus de reactors amb reciclatge de combustible també minimitzen els residus i redueixen el temps que triguen a reduir la radioactivitat a nivells inofensius. Tenen sistemes de seguretat passiva i tipus de construcció modular per fer-los més econòmics.

- **En relació a la fusió nuclear:**
  a) Quins beneficis pot aportar?

     La fusió nuclear tindria dos beneficis principals: seria sostenible, ja que el tipus de combustible es tant abundant; i els residus radioactius de la fusió són molt reduïts comparats amb la fissió i de curta durada.

  b) Quins inconvenients té?

     Crec que en aquests moments els inconvenients són bàsicament els de solucionar l'enginyeria dels reactors. Cal confinar (un verb, per cert, que la pandèmia a posat de moda) els materials amb mètodes inercials o magnètics, ja que no hi ha materials que pugin mantenir les molt altes temperatures que es requereixen. Llavors cal extreure l'energia generada en la fusió, que es un altre procés d'enginyeria prou complicat.

     Quan tots els problemes d'enginyeria s'hagin resolt, llavors caldrà veure si és possible fer reactors de diferents mides i potències, i a quin cost sortirà l'electricitat o altres formes d'energia que generin. Es a dir, la comercialització serà un altre repte.

  c) Pot ser realment l'energia del futur?

     Crec que la fusió pot ser una de les fonts d'energia del futur. Un cop s'hagi desenvolupat tota l'enginyeria, caldrà veure quina comercialització es pot fer: podrà utilitzar-se en xarxes petites, o només es podrà fer en centrals de gran potència ? (en aquests moments hi ha molt d'interès a fer xarxes elèctriques petites).

- **Si el concepte de fusió nuclear existeix des de el 1915 i el primer Tokamak (model de reactor nuclear adoptat per la majoria d'experiments) va ser dissenyat als anys 50, com és que de moment no s'ha registrat cap fusió estable?**

Tot i que el concepte de fusió s'havia proposat fa uns 100 anys, la primera fusió es va aconseguir els anys 50, dintre del programa d'armes atòmiques,

malauradament. Però els problemes de generar les condicions (altes temperatures) que requereix el plasma, i el confinament del plasma, fan que sigui molt difícil tenir un sistema estable on es mantinguin les condicions del plasma i es vagi liquidant l'excés d'energia que es genera.

- **Coneixes el TFTR (TokamakFusion Test Reactor)? Si és així, hi has estat implicat d'alguna manera? Amb quina finalitat? Quins experiments s'hi han efectuat fins el moment?**

  Sé que el TFTR era el primer Tokamak experimental al Priceton Plasma PhysicsLaboratory i és on van aconseguir els primers experiments amb plasma amb confinament magnètic. No hi he estat mai implicat, però crec que van aconseguir arribar a produir certa potència, tot i que crec que no va arribar a produir més energia de la que consumia per produir el plasma. Es van fer experiments que són la base per altres màquines de confinament magnètic.

- **És el Tokamak planejat a l'ITER el millor model de reactor de fusió nuclear a l'actualitat? O n'hi ha de millors que coneguis?**

  Crec que en aquests moments l'ITER és el model que més promet. Es una col·laboració entre molt països i representa el que més es coneix en fusió.

  De totes maneres, darrerament hi ha un altre projecte basat al MIT (Massachusets Institute of Technology) on estan desenvolupant un altre sistema de reactor de fusió, més petit que l'ITER. No en sé detalls, però potser ho pots trobar el web del MIT (crec que del reactor en diuen SPARC)

- **Quines seran les fonts d'energia més importants en el futur proper, segons el teu parer?**

  En el futur proper, el gas natural tindrà un paper important en la generació d'electricitat perquè es preveu que els costos seguiran essent molt competitius. Però el gas natural no és sostenible ni ecològic (crema més net que el petroli i el carbó, però genera CO2), i s'anirà eliminant. Crec que l'energia nuclear de fissió jugarà un paper més important quan es comercialitzin reactors que s'estan desenvolupant amb reciclatge de combustible i de construcció modular (Small Modular Reactors). Naturalment, les energies renovables (eòlica i solar) jugaran també un paper cada vegada més important. Totes aquestes fonts aniran creixent a costes del carbó.

- **Per acabar, trobes necessari haver de sortir d'Espanya actualment per poder-te dedicar a la ciència o camps tècnics, com en el teu cas? Perquè vas decidir fer-ho? Aconsellaries a les noves generacions que s'ho plantegessin des d'un primer moment?**

Per dedicar-te a la ciència o a la recerca, hi ha encara millors oportunitats a l'estranger. Això era certament el cas en l'època que jo vaig marxar, però tot i que avui dia es fa més feina a les universitats, no hi ha encara gaires centres de recerca (es pot veure que a les revistes científiques internacionals hi ha molt poques contribucions de centres o universitats catalanes o espanyoles, cosa que indica que no es fa gaire recerca capdavantera).

Una de les coses que ha canviat, però, és que a la meva època era més fàcil venir als USA que a un país europeu. Però ara, dins de la comunitat, hi ha millor accés als centres de recerca europeus, i certament als d'enginyeria nuclear, sobretot a França.

Jo ho vaig fer per poder-me dedicar a la recerca, i encara aconsellaria a les noves generacions anar a un centre europeu o americà, si més no per uns anys. Sobretot en el tema nuclear, i de fusió, els projectes són molt costosos i gairebé tots es fan en col·laboracions internacionals.

CONCLUSIONS

Per acabar, crec que s'han més que satisfet les ànsies de coneixement que tenia d'aquest tema i, finalment, he pogut comprendre, conceptualment, aquest món de l'energia nuclear de fusió, els comportaments bàsics dels àtoms, el funcionament d'un reactor de fusió, com extreure'n energia i el motiu pel que s'està tardant tant en arribar a l'objectiu final d'aquest camp; poder generar una reacció estable per poder-nos començar a aprofitar d'aquest mecanisme net i pràcticament il·limitat de obtenció d'energia. L'única espina que em queda clavada, tot i que, com vaig esmentar a la introducció aquest treball era purament conceptual, és poder arribar a comprendre matemàticament el procés, ja que en el decurs del treball m'he trobat amb infinitat de formules que no he sigut capaç d'entendre del tot, em queda com una assignatura pendent per un futur no gaire llunyà, esperem.

No tot ha sigut bufar i fer ampolles. A mesura que he anat fent aquest TDR m'he anat trobant amb petites pedres per el camí. Entre elles, les dos que destacaria són: la dificultat d'entendre els conceptes físics que envolten aquest tema, i, sobretot, la falta d'informació en català o castellà sobre el tema. Quan passeu per la bibliografia, notareu que la majoria de pàgines, excepte les més genèriques són escrites en anglès que, tot i que no em genera un problema a l'hora d'entendre-ho gràcies a que tinc el nivell suficient per fer-ho, si que ho fa a l'hora de traduir-ho, ja que pàgines com el traductor de Google moltes vegades manquen de sentit en la traducció, i en la major part dels casos la he fet jo a mà. A part, hi ha molts conceptes molt específics o tècnics que són difícils o impossibles de traduir literalment al nostre idioma.

Després d'haver-me informat sobre el tema, puc dir que he acabat generant una opinió bastant clara sobre la pregunta en la que s'ha basat tot el meu treball: És realment l'energia nuclear de fusió l'energia del futur? Sí, tot i que hi ha uns quants peròs. Sí, crec que l'energia nuclear de fusió ens pot aportar una gran capacitat de generar energia pràcticament neta i inesgotable i ajudar a frenar el dany al medi ambient. Però lluny de substituir les energies que tenim avui en dia, tant com les netes, com les contaminants, crec que jugarà un rol com si fos un tipus d'obtenir energia més, entre altres coses pels grans interessos econòmics que recauen sobre les energies fòssils i per la viabilitat que continuen tenint les energies renovables actuals. A part de les energies renovables que segurament continuaran el seu creixement, podem preveure també una millora a l'energia nuclear. Tal com indica el Dr. Jordi Roglans, es treballa en una nova generació de reactors de fissió, que optimitzaran el rendiment del combustible, l'urani, generant menys residus i augmentant-ne la seguretat. Tot plegat farà que sigui una font d'energia més rendible i menys agressiva amb el medi ambient.

Sobre l'ITER, crec que és i serà un dels projectes més importants de la història, però no el futur. És un gran pas per introduir a la humanitat a aquest nou tipus de mètode i experimentar amb ell, però ja avui en dia estan sortint alternatives més prometedores que el model de reactor amb el que es basa l'ITER, que amb el suficient desenvolupament i investigació apunten a rellevar als tokamak en quant a reactors de fusió nuclear es refereix. Per tant , el projecte ITER ha de servir com a primer i importantíssim pas a l'estudi de la fusió nuclear. A partir d'aquest, s'obre un camp nou que segur que aportarà nous coneixements i tecnologia que, en el decurs del temps, poden esdevenir la clau per a fer viable una gran fon d'energia pràcticament neta i inesgotable.

NOTA D'AGRAÏMENTS

Voldria agrair la col·laboració de moltes persones en la realització d'aquest treball. En primer lloc, els meus 2 tutors Agnés Coll i Lluís Drou així com Jordi Roglans i Ribas per la seva bona predisposició. Tanmateix, aquest treball no hagués estat possible sense la col·laboració dels meus pares, en especial el meu pare al acompanyar-me en el trajecte a França per poder visitar les instal·lacions de l'ITER.

BIBLIOGRAFIA

Recursostic.educacion.es. [Consultat: 8 /2/2020]. Disponible a Internet: <http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales_didacticos/EDAD_3eso_reacciones_quimicas_2/3quincena10/escenas/amplumagramo.htm>

Abcnews. [Consultat: 6/3/2020]. Disponible a Internet: <https://www.abc.net.au/news/2020-04-08/future-tense-nuclear-fusion-sustainable-power-promise/12114948>

Hyperphysics. [Consultat: 5/9/2020]. Disponible a Internet: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/NucEne/lawson.html>

Hyperphysics. [Consultat: 5/9/2020]. Disponible a Internet: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html >

Cienciadefrontera. [Consultat: 5/9/2020]. Disponible a Internet: <http://cienciadefrontera.blogspot.com/2011/08/fusion-nuclear.html>

Viquipèdia. [Consultat: 6/9/2020]. Disponible a Internet: <https://es.wikipedia.org/wiki/Barrera_de_Coulomb >

Energia-nuclear.net. [Consultat: 6/9/2020]. Disponible a Internet: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/ion>

QuantumFracture. [Consultat: 6/9/2020]. Disponible a Internet: <https://www.youtube.com/watch?v=wLL1VEuwmw8>

Viquipèdia. [Consultat: 7/9/2020]. Disponible a Internet: <https://es.wikipedia.org/wiki/Reactores_de_fusi%C3%B3n_nuclear#Tokamak>

Deberes.net.[Consultat: 7/9/2020]. Disponible a Internet: <https://www.deberes.net/tecnologia/tokamak-que-es-y-como-funciona/>

Definicion.de. [Consultat: 7/9/2020]. Disponible a Internet: <https://definicion.de/superconductor/>

Norvento. [Consultat: 7/9/2020]. Disponible a Internet: <https://www.norvento.com/fusion-nuclear/>

Energia-nuclear.net .[Consultat: 19/9/2020]. Disponible a Internet: <https://energia-nuclear.net/funcionamiento-central-nuclear/combustible-nuclear/tritio>

Cienciadefrontera. [Consultat: 19/9/2020]. Disponible a Internet: <http://cienciadefrontera.blogspot.com/2011/08/residuos-radiactivos-en-fusion-nuclear.html>

Viquipèdia. [Consultat: 19/9/2020]. Disponible a Internet: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Heli_3>

Consejo de seguridad nuclear. [Consultat: 30/9/2020]. Disponible a Internet: <https://www.csn.es/ca/fusion-nuclear>

Iter.org. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/vacuumvessel>

Iter.org. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/blanket>

Subject Zero Scince. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.youtube.com/watch?v=XNcGpQCX8a0>

Iterorganization. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.youtube.com/watch?v=MP2aV26X-70>

Viquipèdia. [Consultat: 27/10/2020]. Disponible a Internet: <https://en.wikipedia.org/wiki/SPARC_(tokamak) >

Iter.org. [Consultat: 14/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/construction/SiteFabricationPFcoils>

Iter.org. [Consultat: 15/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/Magnets>

Iter.org. [Consultat: 15/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/cryostat>

Subject Zero Scince. [Consultat: 21/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.youtube.com/watch?v=qKTePWmHRQw>

Tokamak.info. [Consultat: 21/11/2020]. Disponible a Internet: <http://www.tokamak.info/

Tdx.cat. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6598/05Capitulo05.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Bibliografia d'imatges:

1. [Consultat: 8/2/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=dt+reaction&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk03rRp6g7pbXgcATFzVJfVhobggcrw:1607034477123&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjw5ZX57bLtAhVwTxUIHUDIDTIQ_AUoAXoECAYQAw&biw=960&bih=964>

2. [Consultat: 2/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=tokamak+plasma&tbm=isch&ved=2ahUKEwiWyOW67rLtAhUBTBoKHc2cDWgQ2-cCegQIABAA&oq=tokamak+plasma&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECAAQEzIECAAQEzIICAAQCBAeEBM6BggAEB4QE1DZNliWRWDzRWgAcAB4AIABaIgB8wSSAQM2LjGYAQCgAQGqAQtnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=9mbJX5b1KIGYac25tsAG&bih=964&biw=960&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca>

3. [Consultat: 1/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=CERN&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk008dinNtlal77jXYHIQ5pasZRIyYA:1606851884367&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi-vZjexa3tAhVFOhoKHbjMA_0Q_AUoAXoECAYQAw&biw=1920&bih=969>

4. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=sol&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk03jbK5-C9oCEua1-ixTEGjTqyd5bQ:1606852358076&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjrpInAx63tAhULvRQKHU74AgAQ_AUoAXoECA4QAw&biw=960&bih=964>

5. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://wikimedia.org/api/rest_v1/media/math/render/svg/fbca44417f6ff26080afe3358fdbe36d9002e09b>

6. Foto pròpia.

7. [Consultat: 1/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=John+David+Lawson&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk015H8Kt7kPJ9vNgSjklyLZjYW1eQ:1606854441066&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjN8aihz63tAhWKx4UKHWr_BrsQ_AUoAXoECAUQAw&biw=960&bih=964 >

8. [Consultat: 1/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=TFTR&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk00ra_YBjwRAd5FbRK4kwhTagtfLGw:1606854413455&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi17JOUz63tAhXQxoUKHfPcD94Q_AUoAXoECAUQAw&biw=960&bih=964 >

9. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=tokamak&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk03eXf9c86Hhzq5HHb2sfgByBxdaKg:1607034889922&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi3l4W-77LtAhWRSxUIHTFcA-0Q_AUoAXoECA0QAw&biw=960&bih=964>

10. [Consultat: 2/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=deuterium-helium+reaction&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk03c37QStINxadLcKuhdjZbR7Es4bg:1607033519351&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiNh8Cw6rLtAhXsAWMBHWtdBcoQ_AUoAXoECA4QAw&biw=960&bih=964 >

11. [Consultat: 1/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=Andrei+Sajarov&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk00CFFsEYKOGGTa0fWCuftMQyttFQw:1606928762122&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjfqK6Q5K_tAhWLoBQKHVB8DsgQ_AUoAXoECAUQAw&biw=960&bih=964 >

12. [Consultat: 1/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=Igor+Tamm&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk01bMgqlDAVWHsXfkvO2vSDNW-58Pg:1606928696068&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjPw-7w46_tAhU3D2MBHbvNAc8Q_AUoAXoECAUQAw&biw=960&bih=964 >

13. [Consultat: 7/9/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=toroid&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk00v8i66CayLyAn3Ra6uhd6Euwq07A:1599508997199&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiK9N6s69frAhXj6OAKHbOFCUQQ_AUoAXoECBkQAw&biw=1920&bih=969 >

14. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.youtube.com/watch?v=qKTePWmHRQw> (fragment del vidio)

15. [Consultat: 29/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=DIVERTOR&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk02JhDrRJ4_6Dims3hzRGfbWG8joUA:1605468512608&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwji9pCjpIXtAhWTecAKHWpUBQIQ_AUoAXoECAUQAw&biw=958&bih=955 >

16. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=tokamak+vs+stellarator&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk01-RON5XsvvI6wBfl_0zHhpdnzEHA:1607034996964&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjit4rx77LtAhVDtHEKHWmkBcwQ_AUoAXoECAYQAw&biw=960&bih=964>

17. [Consultat: 29/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=DIVERTOR&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk02JhDrRJ4_6Dims3hzRGfbWG8joUA:1605468512608&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwji9pCjpIXtAhWTecAKHWpUBQIQ_AUoAXoECAUQAw&biw=958&bih=955 >

18. [Consultat: 29/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=DIVERTOR&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk02JhDrRJ4_6Dims3hzRGfbWG8joUA:1605468512608&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwji9pCjpIXtAhWTecAKHWpUBQIQ_AUoAXoECAUQAw&biw=958&bih=955 >

19. [Consultat: 2/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=the+iter+agreement&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk00dC9JKnIKaUu9U7YiYgjn93cFJXw:1606933564267&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwis6ZmC9q_tAhXxQkEAHS1kBaIQ_AUoAXoECAUQAw&biw=960&bih=964 >

20. [Consultat: 30/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=Maqueta+del+tokamak&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk02yqmlgS1e86N_YzkCB7ERARFKJVg:1607037542251&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwivo-Ku-bLtAhWVEMAKHcyLBn8Q_AUoAXoECBEQAw&cshid=1607037548907433&biw=960&bih=964>

21. [Consultat: 15/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/Magnets>

22. [Consultat: 15/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/Magnets>

23. [Consultat: 15/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/Magnets>

24. [Consultat: 16/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/Magnets>

25. [Consultat: 16/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/Magnets>

26. [Consultat: 16/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/Magnets>

27. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/vacuumvessel>

28. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/vacuumvessel>

29. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/blanket>

30. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/blanket>

31. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/blanket>

32. [Consultat: 5/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/blanket>

33. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=DIVERTOR&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&sxsrf=ALeKk02JhDrRJ4_6Dims3hzRGfbWG8joUA:1605468512608&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwji9pCjpIXtAhWTecAKHWpUBQIQ_AUoAXoECAUQAw&biw=958&bih=955>

34. [Consultat: 15/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.iter.org/mach/cryostat >

35. [Consultat: 3/12/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=toroidal+field+coils+transport&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca&sxsrf=ALeKk01hDdgxkyXqnBiE0fiFZR8-qK8hhQ:1607038190756&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjmiYDk-7LtAhUSUcAKHX9HC7sQ_AUoAXoECA8QAw&biw=955&bih=964>

36. [Consultat: 31/10/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=iter+complex&tbm=isch&ved=2ahUKEwiD86jQ_LLtAhUFnRoKHbYFA1gQ2-cCegQIABAA&oq=iter+complex&gs_lcp=CgNpbWcQAzoCCAA6BAgAEB46BAgAEBM6BAgAEBg6BggAEAoQGFDkJVirLGD4LGgAcAB4AIABaYgBjwSSAQM1LjGYAQCgAQGqAQtnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=0XXJX8PGN4W6araLjMAF&bih=964&biw=955&rlz=1C1CHBF_esES840ES840>

37. [Consultat: 28/11/2020]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=iter+cryostat+base&tbm=isch&ved=2ahUKEwjBjo_6_LLtAhVEpBoKHVwVAqMQ2-cCegQIABAA&oq=iter+cryostat+base&gs_lcp=CgNpbWcQA1D3OFjmO2DcPGgAcAB4AIABYYgBwwOSAQE1mAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=KXbJX4HWIsTIatyqiJgK&bih=947&biw=938&rlz=1C1CHBF_esES840ES840&hl=ca>

38. Foto pròpia.

39. Foto pròpia.

40. Foto pròpia.

41. Foto pròpia.

42. Foto pròpia.

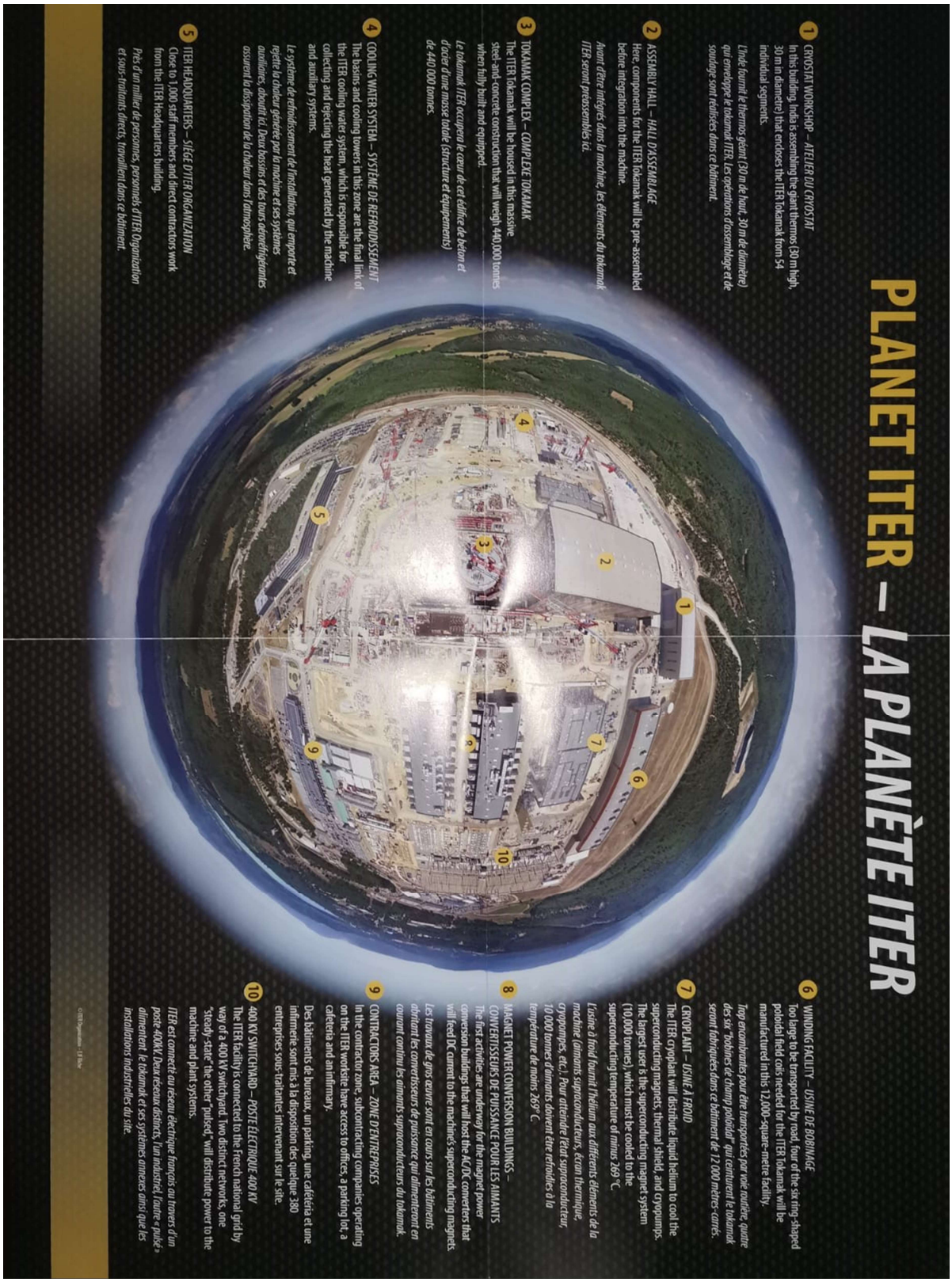
43. Foto pròpia.

44. Foto pròpia.

45. Foto pròpia.

46. [Consultat: 13/01/2021]. Disponible a Internet: <https://www.google.com/search?q=Dr.+Jordi+Roglans-Ribas&rlz=1C1CHBF_esES933ES933&sxsrf=ALeKk03PeB3UF-tBHaopeqT1NbGFHNSsVQ:1610495452747&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj55P2Ky5fuAhURZcAKHRWgAa0Q_AUoAXoECAYQAw&biw=1920&bih=969>

ANNEXES


PLANET ITER – LA PLANÈTE ITER
1 CRYOSTAT WORKSHOP – ATELIER DU CRYOSTAT
In this building, India is assembling the giant thermos (30 m high, 30 m in diameter) that encloses the ITER tokamak from 54 individual segments.
L'Inde fournit le thermos géant (30 m de haut, 30 m de diamètre) qui enveloppe le tokamak ITER. Les opérations d'assemblage et de soudage sont réalisées dans ce bâtiment.
2 ASSEMBLY HALL – HALL D'ASSEMBLAGE
Here, components for the ITER Tokamak will be pre-assembled before integration into the machine.
Avant d'être intégrés dans la machine, les éléments du tokamak ITER seront préassemblés ici.
3 TOKAMAK COMPLEX – COMPLEXE TOKAMAK
The ITER tokamak will be housed in this massive steel-and-concrete construction that will weigh 440,000 tonnes when fully built and equipped.
Le tokamak ITER occupera le cœur de cet édifice de béton et d'acier d'une masse totale (structure et équipements) de 440 000 tonnes.
4 COOLING WATER SYSTEM – SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT
The basins and cooling towers in this zone are the final link of the ITER cooling water system, which is responsible for collecting and rejecting the heat generated by the machine and auxiliary systems.
Le système de refroidissement de l'installation, qui emporte et rejette la chaleur générée par la machine et ses systèmes auxiliaires, aboutit ici. Deux bassins et des tours aéroréfrigérantes assurent la dissipation de la chaleur dans l'atmosphère.
5 ITER HEADQUARTERS – SIÈGE D'ITER ORGANIZATION
Close to 1,000 staff members and direct contractors work from the ITER Headquarters building.
Près d'un millier de personnes, personnels d'ITER Organization et sous-traitants directs, travaillent dans ce bâtiment.
6 WINDING FACILITY – USINE DE BOBINAGE
Too large to be transported by road, four of the six ring-shaped poloidal field coils needed for the ITER Tokamak will be manufactured in this 12,000-square-metre facility.
Trop encombrantes pour être transportées par voie routière, quatre des six "bobines de champ poloïdal" qui ceinturent le tokamak seront fabriquées dans ce bâtiment de 12 000 mètres-carrés.
7 CRYOPLANT – USINE À FROID
The ITER cryoplant will distribute liquid helium to cool the superconducting magnets, thermal shield, and cryopumps. The largest user is the superconducting magnet system (10,000 tonnes), which must be cooled to the superconducting temperature of minus 269 °C.
L'usine à froid fournit l'hélium aux différents éléments de la machine (aimants supraconducteurs, écran thermique, cryopompes, etc.). Pour atteindre l'état supraconducteur, 10 000 tonnes d'aimants doivent être refroidies à la température de moins 269° C.
8 MAGNET POWER CONVERSION BUILDINGS – CONVERTISSEURS DE PUISSANCE POUR LES AIMANTS
The first activities are underway for the magnet power conversion buildings that will host the AC/DC converters that will feed DC current to the machine's superconducting magnets.
Les travaux de gros œuvre sont en cours sur les bâtiments abritant les convertisseurs de puissance qui alimenteront en courant continu les aimants supraconducteurs du tokamak.
9 CONTRACTORS AREA – ZONE D'ENTREPRISES
In the contractor zone, subcontracting companies operating on the ITER worksite have access to offices, a parking lot, a cafeteria and an infirmary.
Des bâtiments de bureaux, un parking, une cafétéria et une infirmerie sont mis à la disposition des quelque 280 entreprises sous-traitantes intervenant sur le site.
10 400 KV SWITCHYARD – POSTE ÉLECTRIQUE 400 KV
The ITER facility is connected to the French national grid by way of a 400 kV switchyard. Two distinct networks, one "steady-state" the other "pulsed", will distribute power to the machine and plant systems.
ITER est connecté au réseau électrique français au travers d'un poste 400kV. Deux réseaux distincts, l'un industriel, l'autre « pulsé » alimentent le tokamak et ses systèmes annexes ainsi que les installations industrielles du site.
©ITER Organization - I.B.Tech

Institut Frederic Marti Carreras PALAFRUGELL

iter
superdry